АКАДЕМІЯ НАУК УКРАЇНИ
ІНСТИТУТ МЕХАНІКИ

На правах рукопису

УДК 539.3

ЯКОВЛЕВА Олена Сергіївна

КРАЙОВІ ЕФЕКТИ В ШАРУВАТИХ КОМПОЗИТАХ З РОЗРИВНИМ НАПОВНЮВАЧЕМ

(01.02.04.— Механіка деформівного твердого тіла)

АВТОРЕФЕРАТ
дисертації на здобуття наукового ступеню
кандидата фізико-математичних наук

Київ 1993

Робота виконана в Інституті механіки АН України

Науковий керівник	— академік АН України, доктор технічних наук, професор ГУЗЬ О. М.
Науковий консультант	— доктор фізико-математичних наук КОХАНЕНКО Ю. В.
Офіційні опоненти:	доктор технічних наук СЕМЕНЮК М. П.
	кандидат фізико-математичних наук ГАРАЩУК І. М.
Ведуча установа	Київський інженерно-будівельний інститут

Захист дисертації відбудеться « » . . . . . 1993 в . . . . годин на засіданні спеціалізованої ради при Інституті механіки АН України (252057, Київ-57, вул. Нестерова, 3).

З дисертацією можна ознайомитися у науковій бібліотеці Інституту механіки АН України.

Автореферат розіслано « » . . . . . 1993 р.

Вчений секретар
спеціалізованої ради
д.ф.-м.н. **НАЗАРЕНКО В. М.**

ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА РОБОТИ

А к т у а л ь н і с т ь т е м и. У зв'язку з широким використанням в техніці та інженерній практиці композитних матеріалів все більшу актуальність набувають дослідження з механіки композитних матеріалів і, зокрема, дослідження, пов'язані з вивченням пружної поведінки композиту. Отримані результати знайшли своє відображення в роботах вчених Київської, Московської, Ленінградської, Ризької та інших шкіл.

При вивченні лінійно-пружної поведінки композитів велике значення має визначення пружно-деформованого стану в областях,що характеризуються наявністю швидко змінних досліджуваних факторів. Такі області є областями крайових ефектів. Існують принаймні два можливих напрямки їх дослідження. З одного боку це дослідження пружно-деформованого стану біля джерела збурення, а з другого - це визначення області збурення напружень. Наприклад, якщо джерелом збурення є тріщина, то в рамках першого напрямку досліджуються крайові ефекти в композитних матеріалах в околі вершини тріщини. Тобто досліджуються умови розвитку тріщини. В рамках другого напрямку вивчається область розповсюдження збурення пружно-деформованого стану. Тобто визначається така область, в якій напруження, що виникли внаслідок наявності одного з факторів збурення напружень, відрізняються (з певною точністю) від незбуреного напруженого стану. Власне, термін "крайові ефекти" стосується лише концентрацій напружень, що описуються в рамках другого підходу. Зацікавленість в дослідженні областей крайових ефектів пов'язана з тим, що їх наявність є однією з причин руйнування матеріалу.

Аналіз наявних публікацій дозволяє зробити висновок, що до дослідження крайових ефектів застосовуються як наближені, так і точні підходи. В роботах Болотіна В.В., Григоренко Я.М., Гузя О.М., Корнева В.М., Ніколаєва В.П., Новічкова Ю.Н., Пелеха Б.Л., Победрі Б.Е., Тамужа В.П., Хорошуна Л.П., Choi I., Dong S.B., Goetshel D.B., Hu T.H., Pagasno N.J., Pipes R.B., крайові ефекти в композитах та пов'язані з ними питання визначення напруженого стану добре вивчені в рамках прикладних двовимірних теорій або тривимірних рівнянь при використанні континуальної моделі композитного середовища

Дослідження крайових ефектів в рамках точного підходу означає використання тривимірного підходу спільно з описанням композиту у рамках моделі кусково-однорідного середовища та використання точних критеріїв оцінки крайових ефектів. В роботах Гузя О.М., Коханенко Ю.В., Бистрова В.М. в рамках точного підходу досліджено крайові ефекти для шаруватих та волокнистих композитів та розглянуто задачу про одну тріщину в армуючому шарі шаруватого слабоармованого композиту. Отже, до цього часу практично не було розглянуто задач про визначення областей крайових ефектів в композитах при наявності розривів армуючого елементу. Такі задачі є актуальними і їх розв'язання розглядається в даній дисертації. Ефективними методами розв'язання вказаних задач є чисельні методи, зокрема метод скінчених різниць.

Ц і л л ю р о б о т и є дослідження величини областей крайових ефектів в шаруватих слабоармованих композитах та композитах регулярної структури з розривним наповнювачем, яке включає:

- загальну (диференційну, різницеву) постановки задач визначення крайових ефектів в рамках точного підходу, тобто при використанні рівнянь лінійної теорії пружності, моделі кусково-однорідного середовища та точних критеріїв визначення величини крайових ефектів;

- розв'язання нових конкретних задач для шаруватих композитів з різного типу розривами в шарах наповнювача, аналіз затухання крайового ефекту в залежності від значення співвідношення модулів пружності шарів та об'ємного вмісту наповнювача.

Н а у к о в а н о в и з н а дисертації є в тому що:

- в рамках моделі лінійно-пружного однорідного анізотропного середовища дана постановка задач визначення крайового ефекту в шаруватих та слабоармованих композитних матеріалах з розривним наповнювачем;

- отримано розв'язок задач визначення крайових ефектів в шаруватих композитах для випадків двох тріщин у сусідніх шарах наповнювача та періодичної системи тріщин, а також в слабоармованих композитах для випадків двох тріщин в одному шарі наповнювача, та у випадку порожнини в шарі наповнювача;

- досліджено залежність величини області крайового ефекту від значення співвідношення механічних характеристик наповнювача та зв'язуючого, а також від процентного вмісту наповнювача для шаруватих композитних матеріалів, та визначено процентний вміст

наповнювача, при якому композит можна вважати слабоармованим.

П р а к т и ч н а ц і н н і с т ь. Результати роботи можна використати:

а) для точної оцінки величини крайових ефектів та дослідження полів напруження в шаруватих та слабоармованих композитах при різних значеннях співвідношення механічних характеристик компонент та їх процентного вмісту (для шаруватих композитів);

б) для визначення меж використання прикладних теорій при дослідженні крайових ефектів в композитних матеріалах.

А п р о б а ц і я р о б о т и. Результати роботи докладались та обговорювались на 15-й науковій конференції молодих вчених Ін-ту механіки АН України (Київ, 1990), на 4-му Симпозиумі "Прочность материалов и элементов конструкций при сложном напряженном состоянии" (Севастополь 1992), на семінарах ввідділу динаміки та стійкості суцільного середовища Інституту механіки АН України (Київ 1990, 1992, 1993).

П у б л і к а ц і ї. Основні результати дисертації відображені в роботах [1-5].

О б'є м р о б о т и. Дисертація складається з вступу, чотирьох розділів, висновків та списку літератури, що налічує 58 найменувань. Загальний об'єм роботи, враховуючи 40 малюнків, складає 115 сторінок машинописного тексту.

Автор висловлює глибоку подяку своєму науковому керівнику академіку АН України Гузю Олександру Миколайовичу та науковому консультанту доктору фізико-математичних наук Коханенко Юрію Васильовичу за допомогу та постійну увагу до роботи.

ЗМІСТ ДИСЕРТАЦІЇ

У вступі зроблено короткий огляд літератури, присвячений питанням визначення крайових ефектів в композитних матеріалах. В рамках прикладних та точних підходів викладено стан справ по даній проблемі.

У п е р ш о м у р о з д і л і наведена диференційна постановка задач визначення крайових ефектів для шаруватого композитного матеріалу, що складається із ортотропних шарів, моделлю якого є шарувате середовище, що складається з жорстко зв'язаних ортотропних шарів, які періодично чергуються. Джерелом локального збурення поля напружень є розрив армуючого шару. Доведено такі

властивості операторів вихідних диференційних задач як додатня означеність та самоспряженість. Постановку задач розглянуто при довільних граничних умовах та при дії зовнішніх сил, що становлять кусково-неперервні функції координат.

Крайовий ефект в шаруватому композиті розглядається в тривимірній постановці. Віднесем композит до декартової системи координат $OX_1X_2X_3$. Нехай композит займає в ній довільну зв'язну область $\bar{\Omega}$ з границею Г. Область $\bar{\Omega}$ являє собою об'єднання паралелепіпедів, утворених поверхнями паралельними координатним площинам. $\bar{\Omega}=\bigcup_{m=1}^{M}\bar{\Omega}^{(m)}$, $\Gamma=\bigcup_{m=1}^{M}\Gamma^{(m)}=\bigcup_{m=1}^{M}(\Gamma_\sigma^{(m)}\cup\Gamma_u^{(m)}\cup\Gamma_k^{(m)})$, де Γ_σ, Γ_u, Γ_k - ділянки границі на яких задані природні, головні, контактні умови.

З урахуванням геометрії шаруватого середовища та регулярності його структури задачі визначення крайового ефекту зводиться до розв'язання плоскої задачі теорії пружності (плоска деформація) для розрахункової області, що відповідає двошаровому елементу періодичності, та аналізу напруженого стану при використанні точного критерію згасання крайового ефекту,

За умови періодичності поверхневого навантаження задача може розглядатися на елементі, що включає скінчену кількість шарів, а згасання крайового ефекту може бути визначено "виходом" на однорідний пружно-деформований стан в кожному шарі. Розрахункова область визначається в результаті обчислювального експерименту, при якому визначаються такі розміри області, подальше збільшення яких не впливає на результати досліджень.

Відповідно до вищесказаного, задачі визначення крайових ефектів сформулюємо таким чином. В області $\bar{\Omega}$, зайнятою композитом, необхідно визначити векторну функцію $u(u_1,u_2)$, що задовольняє рівнянням рівноваги

$$\sigma_{ji,i}=0\,,\quad x\in\Omega \tag{1}$$

граничним умовам

$$(N_j\sigma_{ij}=P_i)\vee(u_i=v_i),\ (x\in\Gamma_\sigma)\vee(x\in\Gamma_u) \tag{2}$$

та умовам ідеального контакту на границі компонент композиту

$$([u_i]=0)\wedge([N_j\sigma_{ij}]=0),\quad x\in\Gamma_k. \tag{3}$$

Закон Гука та співвідношення Коші для ортотропного тіла в межах компоненти композиту має вигляд

$$\sigma_{ij} = \bar{\sigma} A_{ij} \varepsilon_{ik} + 2(1-\sigma_{ij})G_{ij} \varepsilon_{ij} \qquad i,j,k=1,2 \qquad (4)$$

$$\varepsilon_{ij}=\frac{1}{2}(u_{i,j} + u_{j,i}). \qquad (5)$$

Величина довжини крайового ефекту d_{ij} для напруження σ_{ij} визначається радіусом-вектором r точки $x = (x_1,x_2)$, починаючи з якої у напрямі вектора r значення компоненти σ_{ij} $(x \in \Omega)$ в середині області дорівнює (з заданою похибкою) деякому встановленому значенню $\bar{\sigma}$ $(x \in \Gamma_\sigma)$ на границі композиту. Критерій можна записати у вигляді

$$\sigma^*_{ij} (x \in \Omega) = \sigma^*_{ij} (x \in \Gamma_\sigma)+ 0{,}01\rho \qquad \sigma_{ij} = \sigma_{ij}/\bar{\sigma} \qquad (6)$$

$$d_{ij} =(x_1^2+ x_2^2)_{ij} \qquad i,j = 1,2 . \qquad (7)$$

У другому розділі наведено спосіб побудови різницевих схем задач визначення крайових ефектів,та досліджено властивості цих задач. Показано, що різницевим операторам притаманні властивості самоспряженості та додатньої визначеності. Розглянуто методи розв'язання різницевих задач.

Для побудови різницевої схеми в області $\bar{\Omega}$, яку займає композит, звичайним способом наноситься нерівномірна різницева сітка $\bar{\omega}=\omega\cup\gamma$, $\gamma=\gamma_{\tau_1}\cup\gamma_{y_1}$, де γ_{τ_1} (γ_{y_1})-ділянки границі, на яких задані природні(головні) умови. Сітка наноситься так, щоб в межах комірки сітки композитний матеріал був однорідним. Тоді комірку сітки можна характеризувати її геометричними та механічними параметрами (розміри комірки та пружні сталі компоненти композиту, що її заповнює). Виділимо комірку сітки, віднесемо її до системи координат X_1OX_2, занумеруємо її вузли та поставимо у відповідність кожному вузлу комірки векторний параметр $\xi=(\xi_1,\xi_2)$. Набір параметрів ξ, однозначно відповідаючий множині вузлів комірки, визначається із співвідношень $\xi=(\xi_1,\xi_2)=(\pm1,\pm2)$. Зазначимо, що до кожного сіточного вузла прилягає певна кількість (від 1 до 4) комірок. При цьому комірки можуть належати як різним компонентам композиту, так і одній компоненті. У вузлі сітки є комірки сітки варіаційно-різницевим способом будується різницева схема, яка називається - базовою схемою. Базова схема має вигляд

$$a(\xi)y=\varphi(\xi) \qquad (8)$$

або в координатній формі

$$a_1(\xi)y=\varphi_1(\xi) \tag{9}$$

де

$$a_1(\xi)y=-h_1h_2\frac{\tau_{j1}^{\xi_j}+\tau_{j1}}{\eta_{\xi_j}} \tag{10}$$

$$\varphi_1(\xi)=+h_1h_2\left(\frac{2P_{in}}{\eta_{\xi_n}}\right) \tag{11}$$

$$\tau_{ij}=\delta_{ij}A_{ik}e_{kk}+2(1-\delta_{ij})G_{ij}e_{ij};$$

$$e_{ij}=0.5(y_{i,\xi_j}+y_{j,\xi_i})$$

тут τ_{ij}, e_{ij} - різницеві аналоги напружень σ_{ij} та деформації ε_{ij}.

$$y_{,\xi_i}=\frac{y^{\xi_i}-y}{\eta_{\xi_i}} \tag{12}$$

$\eta_{\xi_i}=x^{\xi_i}-x^i$ - крок сітки у вузлі x у напрямі x_i ($\eta_{\xi_i}>0$ при $\xi_i>0$, $\eta_{\xi_i}<0$ при $\xi_i<0$). Співвідношення (12) визначає ліву (при $\eta_{\xi_i}<0$) та праву (при $\eta>0$) різницеві похідні. $y^{\xi_i}=y(x^{\xi_i})$-сіточна функція у вузлі x^{ξ_i}, x^{ξ_i} - вузол, сусідній з вузлом x у напрямі x_i^{ξ}

Різницева схема будується як сума базових схем, виписаних для тих параметрів ξ, що належать сітковому вузлу θ. Ця різницева схема відповідає випадку коли на всій границі задані природні граничні умови. Для змішаної задачі робиться корекція різницевої схеми таким чином: якщо по i-й компоненті у вузлі θ задано головні граничні умови, то вони являють собою i-ту компоненту різницевого оператора. Таким чином, на сітці $\bar{\omega}$ конкретній диференційній задачі (1)-(7) ставиться у відповідність різницева задача

$$Ay=\Phi \quad \text{або} \quad A_iy=\Phi_i$$

де

$$A_iy=\begin{cases}\sum\limits_{\xi\in x^i}a_i(\xi)y \\ y_i\end{cases}; \qquad \Phi_i=\begin{cases}\sum\limits_{\xi\in x^i}\varphi_i(\xi), & x\in\bar{\omega}\setminus\gamma_y \\ \upsilon_i, & x\in\gamma_y\end{cases} \tag{13}$$

Знак $\sum\limits_{\xi\in x}$ означає, що у вузлі $x\in\bar{\omega}$ додаються складові різницевої схеми для тих параметрів ξ, які відповідають вузлу x. Для розв'язування різницевої задачі використовується метод спряжених градієнтів та явний однокроковий метод.

У третьому розділі наведені результати розрахунків полів напруження та визначення областей крайових ефектів в шаруватому композиті, що має дві тріщини в сусідніх шарах наповнювача, та для композиту, що має періодичну систему тріщин в шарах наповнювача (тобто шари з тріщиною і без тріщини чергуються). Для випадку двох тріщин в сусідніх шарах наповнювача розміри розрахункових областей, в результаті обчислювального експерименту були встановлені такими: $l=4S$; $L=5S+l_2$ де $S=2(l_1+l_2)$- параметр внутрішньої структури композиту, l- розмір розрахункової області у напрямі x_2 ; L- розмір розрахункової області у напрямі x_1. Для випадку періодичної системи тріщин розміри розрахункової області були: $l=2,25S$, $S=2(l_1+l_2)$, l- розмір розрахункової області у напрямі x_2.

При розв'язанні задач досліджувались зони концентрацій напружень σ_{ij} в залежності від співвідношення механічних характеристик компонент композиту із інтервалу $E^{(2)}\leqslant E^{(1)}\leqslant 100E^{(2)}$ та від об'ємного вмісту наповнювача $V_H=l_1/(l_1+l_2)$ із інтервалу $0,3\leqslant V_H\leqslant 0,73$ При цьому крайові ефекти визначались з похибкою в 5%-20% (ρ=5,10,20). Під час розрахунків компоненти композиту вважались ізотропними тілами з характеристиками $E^{(m)},\nu^{(m)}$.

Для двох тріщин в сусідніх шарах наповнювача, у напрямі осі x_2 найбільше значення величина крайових ефектів досягає при $E^{(1)}/E^{(2)}=100$, але в цьому випадку величина крайових ефектів монотонно зростає з ростом величини співвідношення $E^{(1)}/E^{(2)}$($d_{12}\sim 9l_1$). У напрямі x_1 величина крайових ефектів слабо залежить від співвідношення $E^{(1)}/E^{(2)}$ і $d_{12}\sim 3l$. Для напруження σ_{12} крайові ефекти відсутні у шарі наповнювача. Залежність величини крайових ефектів від співвідношення $E^{(1)}/E^{(2)}$ немонотонна і досягає максимуму у напрямі x_2 при $E^{(1)}/E^{(2)}=100$; $d_{22}\sim 3l$, а у напрямі x_1 максимальна величина $d_{22}\sim 4l_1$ при $E^{(1)}/E^{(2)}=100$. Не дивлячись на те, що залежність величини крайових ефектів від співвідношення $E^{(1)}/E^{(2)}$носить немонотонний характер найбільше значення ця величина досягає при $E^{(1)}/E^{(2)}=100$, у напрямі x_2 для напруження σ_{12} і становить 4,5 ширини шару наповнювача. У напрямі x_1 можна вважати, що величина крайових ефектів майже не залежить від співвідношення $E^{(1)}/E^{(2)}$ і лежить у діапазоні від 1,5 до 2 ширин шару наповнювача. Звертає увагу факт відсутності крайових ефектів у шарі наповнювача для напружень σ_{12} і σ_{22}. Крім того, крайові ефекти не виходять за шар зв'язуючого, сусідній з шаром

наповнювача, що має тріщину.

Для періодичної системи тріщин у напрямі осі x_1 максимальні крайові ефекти мають місце для напруження σ_{12} і становлять 4 ширини шару наповнювача. У напрямі x_2 максимальні крайові ефекти мають місце для напруження σ_{22} і становлять дві ширини шару наповнювача. Для напруження σ_{22} є характерним відсутність крайових ефектів в армуючих шарах. Крім того слід зазначити що області крайових ефектів не виходять за шар зв'язуючого, сусідній з шаром наповнювача, що має тріщину.

У четвертому розділі наведено результати розрахунку областей крайових ефектів в слабоармованих композитах для випадків двох тріщин в шарі наповнювача та для порожнини в шарі наповнювача. Для композиту, що має порожнину в шарі наповнювача розміри розрахункової області були встановлені такими: $l_2/l_1=14$; $l/l_1=20$ де l- розмір розрахункової області у напрямі x_2, а l_2- розмір розрахункової області у напрямі x_1, $m=2l_1$, тобто розглянуто квадратну порожнину. Для композиту, що має дві взаємодіючі тріщини в одному шарі наповнювача розміри розрахункової області були встановлені такими: $l_2=15l_1$, $l=20l_1$, де l- розмір розрахункової області у напрямі x_1, l_2- у напрямі x_2. Розрахунки проводились для композитного матеріалу, що складався з лінійно-пружних ізотропних компонент з механічними характеристиками $E^{(i)}, \nu^{(i)}$ ($m=1$ відноситься до шару наповнювача, $m=2$- до шару зв'язуючого). Для зменшення кількості параметрів, від яких залежить величина крайових ефектів, візьмемо $\nu^{(1)}=\nu^{(2)}=0,3$.

Для слабоармованого композиту, що має порожнину в шарі наповнювача, крайові ефекти мають досить великі значення (найбільші серед тих, що ми досі розглядали). Залежність величин крайових ефектів від значення співвідношення носить як монотонний (σ_{12}) так і немонотонний (σ_{11}, σ_{22}) характер. У напрямі осі x_2 найбільших розмірів області крайових ефектів досягають для напруження σ_{11} ($d_{11} \approx 20l_1$), а у напрямі x_1- для напруження σ_{11} та σ_{22} і становлять $d_{22}=d_{11} \approx 13l_1$. Практично відсутні крайові ефекти в шарі наповнювача. У порівнянні з випадком однієї тріщини в слабоармованому композиті, що має порожнину, області крайових ефектів значно більші. Композит можна вважати слабоармованим, якщо вміст шару наповнювача в ньому не перевищує 12%.

Крайові ефекти в слабоармованому композиті з двома тріщинами менші за відповідні крайові ефекти в слабоармованому

композиті, що містить порожнину в шарі наповнювача. Для задачі, розглянутої в цьому параграфі, найбільші області крайових ефектів у напрямі x_2 спостерігаються для напруження σ_{12} і становлять $14l_1$; у напрямі x_1 для напруження σ_{11} та σ_{22} максимальні розміри області крайових ефектів однакові і становлять $10l_1$. Зазначимо відсутність крайових ефектів для напружень σ_{12} та σ_{22} в шарі наповнювача. Ще зазначимо, що переважна більшість областей крайових ефектів розглянутої тут задачі має більші розміри в порівнянні з областями крайових ефектів для композиту з однією тріщиною. Для того, щоб композитний матеріал можна було вважати слабоармованим, вміст шару наповнювача не повинен перевищувати 11%.

У висновках сформульовані основні результати та висновки, отримані в дисертації.

В роботі проведено дослідження величини крайових ефектів в шаруватих слабоармованих композитних матеріалах та композитних матеріалах регулярної структури з розривами в шарі наповнювача. Реалізація поставленої задачі включає:

- загальну (диференційну та різницеву) постановки задач визначення крайових ефектів в рамках точного підходу. Точний підхід являє собою використання рівнянь лінійної теорії пружності моделі кусково однорідного середовища та точного критерію визначення величини крайових ефектів;

- розв'язання нових конкретних задач для шаруватих композитів з різноманітними розривами в шарі наповнювача, аналізу згасання крайового ефекту в залежності від значення співвідношення модулів пружності шарів наповнювача, зв'язуючого та об'ємного вмісту наповнювача композиту.

На основі отриманих результатів зроблено такі висновки:

1.Серед розглянутих задач найбільші величини крайових ефектів спостерігаються в напрямі осей координат.

2. Найбільші розміри областей крайових ефектів мають місце у випадку порожнини в шарі наповнювача в слабоармованому композиті.

3. У напрямі x_1 для напружень σ_{11} та σ_{22} найбільші розміри областей крайових ефектів становлять 7 товщин шару наповнювача,а у напрямі x_2 для напруження σ_{11} вони становлять 10 товщин шару наповнювача.

4. Найменші розміри областей крайових ефектів спостерігаються у випадку періодичної системи тріщин в композиті регулярної структури. Вони становлять три товщини шару наповнювача у напрямі

x_2 і дві товщини шару наповнювача у напрямі x_1 .

5. Для різних компонент тензора напружень спостерігається різна величина крайових ефектів.

6. Для напружень σ_{12} та σ_{22} для деяких задач спостерігається відсутність крайових ефектів в шарі наповнювача.

7. Залежність крайових ефектів від величини співвідношення модулів пружності часто носить немонотонний характер. Так, у випадку двох взаємодіючих тріщин в шарі наповнювача слабоармованого композиту, максимум спостерігався при значенні співвідношення $E^{(1)}/E^{(2)}=50$.

8. Композитний матеріал можна вважати слабоармованим, якщо об'ємний вміст наповнювача не перевищує 11%.

9. У межах похибки в 10% для композитів регулярної структури крайові ефекти згасають в найближчому до дефектного армуючому шарі.

Зміст дисертації відображено в роботах:

1. Гузь А.Н., Коханенко Ю.В., Яковлева Е.С. Определение области краевых эффектов при разрыве наполнителя в слабоармированных композитах // ДАН УССР, сер.А. -1991.- №7. - С.44-47.
2. Гузь А.Н. Коханенко Ю.В. Яковлева Е.С. Определение областей краевых эффктов в слоистых композитах при наличии разрывов наполнителя // Прикл. механика. - 1992. - 28,№3. - С.14-19.
3. Гузь А.Н., Коханенко Ю.В., Яковлева Е.С. Краевые эффекты в композитных материалах содержащих разрывы в слоях наполнителя // 4 Симп. "Прочн. матер. и элементов конструкций при слож. напряж. состоянии", Севастополь, 18-20 июня, 1992: Тез. докл. Киев, 1992. - С.23-24.
4. Яковлева Е.С. Методика численного определения краевых эффектов в слоистых композитах при наличии разрывов наполнителя // Тр. 15 науч. конф. мол. ученых Ин-та мех. АН УССР, Киев, 29 мая - 1 июня, 1990. - Ч.2 / АН УССР. Ин-т мех. - Киев, 1990.- С.351-357.
5. Яковлева Е.С. Численное определение области краевых эффектов в слабоармированном композите с полостью // Прикл. механика. - 1993. - 29,№7. - С.19-22.

Підп. до друку 19.12.93 Формат 60×84 1/16.
Папір друк. № 3. Спосіб друку офсетний. Умовн. друк. арк. 0,10
Умовн. фарбо-відб. 0,81 . Обл.-вид. арк. 1,0 .
Тираж 100 . Зам. № 6981 .

Фірма «ВІПОЛ»
252151, Київ, вул. Волинська, 60.

Ав 28.744