

### Література

1. Анилович В.Я., Грінченко А.С., Литвиненко В.Л. Надежность машин в задачах и примерах. – Харьков. ОКО, 2001. –319с.
2. Ю.П. Холмогорцев. Оптимизация процессов обработки отверстий. – М.: Машиностроение, 1984. – 184с.
3. З.Ю. Шагалова, Н.Г. Сиротинко. Конструювання різального інструменту. – К.: Вища школа, 1970. – 267с.
4. Т. Корн, Т. Корн. Справочник по математике для научных работников и инженеров. – М.: Наука, 1978.– 635с.

Одержано 16.07.2007 р.

УДК 631.3: 531.011

**М. Підгурський, канд. техн. наук**

*Тернопільський державний технічний університет імені Івана Пулюя*

## **ОСОБЛИВОСТІ РОЗВИТКУ ВТОМНИХ ТРІЩИН В ЕЛЕМЕНТАХ СТАТИЧНО НЕВИЗНАЧУВАНИХ РАМНИХ СИСТЕМ МОБІЛЬНИХ МАШИН**

*Проведено порівняльний аналіз кінетики розвитку тріщини у статично визначуваних і невизначуваних системах. Здійснено моделювання розвитку тріщин в статично невизначуваних рамних конструкціях. Проведено їх порівняння з експериментальними даними. Результати досліджень уточнюють напружений стан в елементі статично невизначуваної системи з тріщиною.*

**M. Pidgursky**

## **FEATURES OF DEVELOPMENT OF FATIGUE CRACKS IN ELEMENTS OF THE STATICALLY INDETERMINATE FRAME SYSTEMS OF MOBILE MACHINES**

*The comparative analysis of kinetics of development of crack is conducted in the systems statically indeterminate and determinate. The design of development of cracks is carried out in the statically indeterminate frame. Their comparison is conducted with experimental data. The results of researches specify the stress behavior in the element of the statically indeterminate system with a crack.*

Характерною особливістю рамних конструкцій мобільних машин, у тому числі сільськогосподарських, є, як правило, складна просторова геометрія, і в зв'язку з цим – багаторазова статична невизначеність систем. В процесі експлуатації машин в елементах конструкцій рам в зонах концентраторів напруження рам можуть ініціюватися і розвиватися тріщини, спричиняючи передчасний вихід з ладу конструкцій [1-3].

Відзначимо, що виникнення і розвиток втомних тріщин залежить від багатьох факторів: матеріалу, рівня і характеру розподілу напружень вздовж траєкторії розповсюдження тріщини, рівня залишкових зварних напружень, дефектності, геометричних параметрів конструктивного елемента та ін.[4].

Для опису стадії розповсюдження втомної тріщини заміряють її довжину та кількість циклів навантаження. При постійній амплітуді розмаху прикладених навантажень залежність довжини тріщини  $l$  від числа циклів навантажень зазвичай має вигляд, як на рис.1 (крива I) [4].

Дефекти зварювання в елементах конструкції можуть привести до зародження кількох тріщин, які при циклічному навантаженні об'єднуються в одну магістральну тріщину із стрибкоподібним збільшенням довжини тріщини (рис.1, крива II) [5,6].

На рис.1 (крива III) представлено схематизовану криву, що характеризує сповільнення розвитку тріщини при нерівномірному розподілі напружень вздовж траєкторії розповсюдження тріщини, що пояснюється характерними особливостями вузлів [5], або умовами експерименту [7]. Проте у статично невизначуваних систем уповільнення розвитку тріщини і навіть можлива зупинка їх росту може бути пов'язана також з перерозподілом внутрішніх зусиль між сусідніми елементами при розповсюдженні тріщини в одному з елементів рами [8], а також стисненістю деформацій у самих контурах системи [9, 10].

Отже, аналізуючи закономірності розвитку тріщини (рис. 1) слід відзначити особливості, які характерні тільки статично невизначуваним системам та їх елементам: перерозподіл силових потоків і стисненість деформацій при розвитку тріщин.

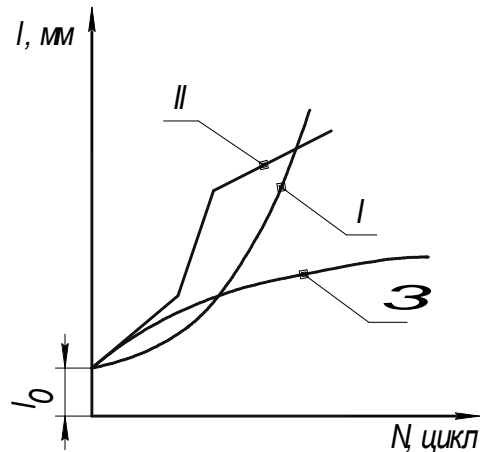


Рисунок 1 – Схематизація кривих росту втомної тріщини при постійній амплітуді розмаху прикладеного зовнішнього навантаження: I – прогресуючий розвиток тріщини;

II – кінетика розповсюдження магістральної тріщини у зварних вузлах при злитті тріщин;

III – уповільнення розвитку тріщини при нерівномірному розподілі напружень вздовж траєкторії розвитку тріщини, або при перерозподілі напружень між елементами конструкції та стисненості деформацій у статично невизначуваних системах

В статично невизначуваних рамних системах мобільних машин тріщини можуть розповсюджуватись на значну довжину – 100-300 мм при загальній довжині тріщин в конструкції до 3,0-4,0 м [2]. Враховуючи, що критерієм граничного стану є остаточне руйнування елемента (для багаторазово статичних невизначуваних систем) або розмір тріщини, що охоплює більше 30-40 % площі початкового перетину балок відкритих і замкнутих профілів, перерозподіл зусиль і стисненість деформацій можуть суттєво вплинути на оцінку загального ресурсу несучої системи при розвитку в ній тріщин. У той же час, відзначені процеси, що відбуваються в складних статично невизначуваних системах, практично не досліджені.

Розглянемо загальний випадок розрахунку статично невизначуваних систем з наявними дефектами. Візьмемо довільну плоску рамну конструкцію на пружних опорах із защемленим одним кінцем та навантажену зовнішньою силою  $F$  (рис.2, а). Перетворимо задану  $n$  раз статично невизначену систему у статично визначувану, усуваючи з неї зайві зв'язки. Отримана система називається основною (рис.2, б). Усунення будь-яких зв'язків не змінює внутрішніх зусиль та деформацій, які виникають в системі, якщо до неї прикладаються додаткові сили і моменти, що представляють собою реакції відкинутих зв'язків. Тому, якщо до основної системи прикласти реакції усунутих зв'язків, то основна (рис. 2,б) і задана (рис.2,а) системи стануть еквівалентними [11].

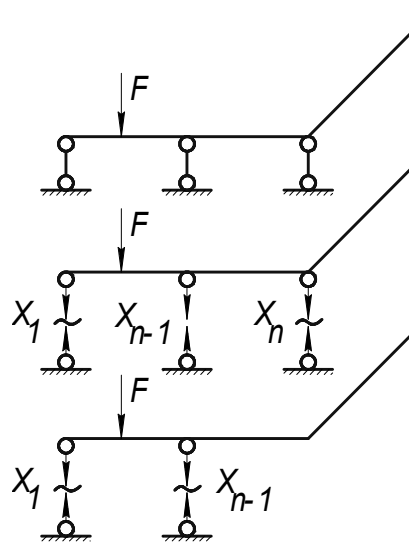


Рисунок 2 - Розрахункові схеми для визначення зусиль у системах з дефектами:  
а- задана система; б- основна система; в- основна система із зруйнованим елементом

Складемо вираз потенціальної енергії деформації  $U$  для основної системи, як функцію навантаження  $F$  і невідомих  $X_1 \dots X_n$ :

$$U = f\{X_1, X_2, \dots, X_n, F\}. \quad (1)$$

За теоремою Кастильяно частинні похідні від виразу потенціальної енергії по основних невідомих рівні переміщенням за напрямком сил  $X_1 \dots X_n$ . Оскільки основна система знаходиться в умовах, аналогічних заданій системі, то вказані переміщення рівні нулю:

$$\frac{\partial U}{\partial X_1} = 0 \dots \frac{\partial U}{\partial X_n} = 0. \quad (2)$$

Отже, при навантаженні статично невизначеної системи основні невідомі (зусилля, що виникають в зайвих зв'язках) мають такі значення, при яких потенціальна енергія системи є мінімальною (принцип найменшої роботи).

Припустимо, що визначені основні невідомі  $X_1 \dots X_n$  відмінні від нуля. Тепер, розглянемо випадок, коли  $X_n = 0$ . Це відповідає умові, коли тріщина розвинулась через весь перетин опори. Очевидно, що умови (2) не будуть виконані і мінімуму потенціальної енергії немає.

Розглянемо основну систему без зв'язку  $n$  (рис.2, в), для якої потенціальна енергія деформації

$$U_1 = f\{X_1, X_2, \dots, X_{n-1}, F\} \quad (3)$$

і нові умови для мінімуму потенціальної енергії деформації:  $\frac{\partial U_1}{\partial X_1} = 0 \dots \frac{\partial U_1}{\partial X_{n-1}} = 0. \quad (4)$

Із умов (4) знайдемо нові значення  $X_1 \dots X_{n-1}$ , які визначають мінімум потенціальної енергії  $U_1$  для системи (рис.2, в). Очевидно, що приєднання сили  $X_n = 0$  не змінить величину потенціальної енергії  $U_1$ , і її мінімум буде більшим (система стала менш жорсткою), ніж мінімум потенціальної енергії системи з повним числом зв'язків:

$$U_{1\min} > U_{\min}. \quad (5)$$

Практично важливим є випадок розвитку тріщини від моменту її зародження до граничного стану, коли довжина тріщини охоплює 30-40% площі поперечного перетину балки. Очевидно, що мінімум потенціальної енергії  $U_{2\min}^{\text{тріщини}}$  системи у цьому випадку займе проміжне положення:

$$U_{1\min} > U_{2\min}^{\text{тріщини}} > U_{\min}. \quad (6)$$

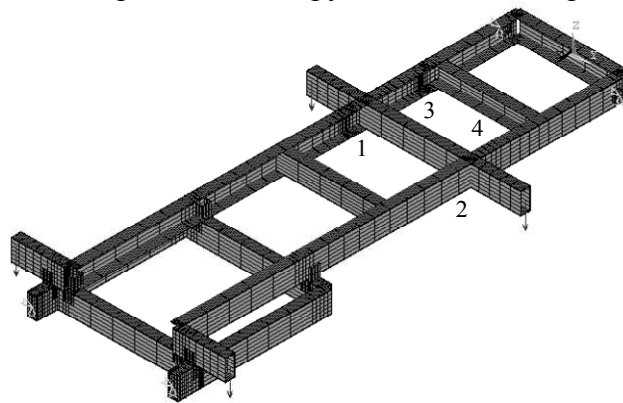
Отже, при частковому (тріщина займає частину перетину) або повному усуненні зв'язку (тріщина перетинає опорний зв'язок), зовнішні сили, які є незмінними, будуть здійснювати більшу роботу, ніж раніше, і система стає менш жорсткою. При цьому відбуватиметься перерозподіл внутрішніх зусиль між елементами багаторазово статично невизначуваної системи. Разом з тим кількісні характеристики цього процесу практично відсутні, незважаючи на актуальність проблеми.

Важливими в цьому напрямку є експериментальні дослідження перерозподілу напружень у зварній рамі причепа БМЗ-887 [8] в залежності від ступеня розвитку дефектності у вузлах. Для цього при випробуваннях рам у лонжеронах швелерного типу виконувались надрізи. Величину пошкодження вибирали такою, щоб виявити закономірності перерозподілу напружень з врахуванням росту тріщини в характерних елементах перетину: полиці, куті і стінці профілю. У результаті проведених експериментальних досліджень (тензометрування рам) отримано величини напружень в лонжеронах та їх перерозподіл при надрізах різної довжини. Відзначимо, що пошкодження будь-якого вузла статично невизначуваної системи (типу рами БМЗ-887) викликало у сусідніх непошкоджених вузлах суттєву зміну рівня циклічних напружень.

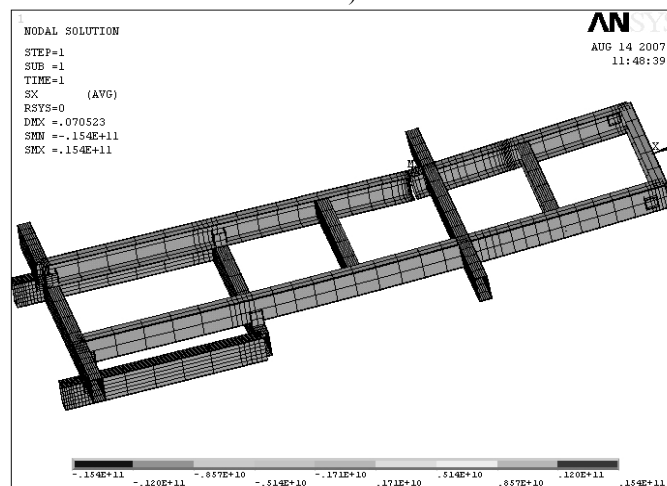
Відзначимо, що проведені випробування причепа БМЗ-887 [8] є трудомісткими та мають високу вартість, а отримані результати стосуються окремої конструкції.

З метою отримання результатів, які можна було б розповсюдити на весь клас рамних конструкцій мобільних машин проведено моделювання і розрахунок конструкцій за допомогою програмного комплексу ANSYS-10.0 [12].

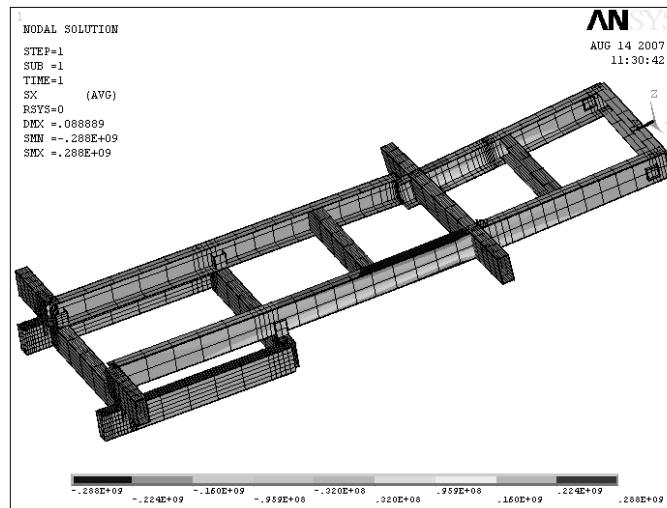
Створюючи скінченно-елементну модель рамної конструкції причепа БМЗ-887, змодельовано надрізи шириною 1 мм, що імітують надрізи в лонжеронах реальних конструкцій. Моделювались два випадки задачі, коли надріз лонжерона виконувався по чергово у двох різних замкнутих контурах системи (рис. 3). Величину пошкодження швелера у кожному випадку вибрано наступною: надріз полиці на всій її довжині; надріз сягає середини швелера; повністю зруйнований лонжерон.



a)



б)



в)

Рисунок 3 – Розрахункові моделі рамної конструкції причепа БМЗ-887:  
а – загальна розрахункова схема; б – НДС рами при 50% пошкодженні вузла 1;  
в – НДС рами при руйнуванні вузла 1

Отримані результати досліджень вказують на наступні закономірності, характерні для обох пошкоджених контурів. Зокрема, пошкодження вузла в одному з контурів практично не впливає на перерозподіл напружень в елементах сусіднього контура. У межах одного контура, при пошкодженні одного з лонжеронів (більше 20-50% перетину) поступово збільшуються напруження в іншому, непошкодженному, лонжероні (рис.4, а). При 100% пошкодженні одного з лонжеронів, як показали розрахунки МСЕ, напруження  $\sigma$  зростають вдвічі в іншому, непошкодженному, лонжероні у порівнянні з початковим станом  $\sigma_0$ . Це свідчить, що непошкоджений лонжерон сприймає навантаження, яке раніше розподілялось на два лонжерони.

Характер зміни напружень в пошкоджених вузлах 1 і 3 показаний на рис. 4,б.

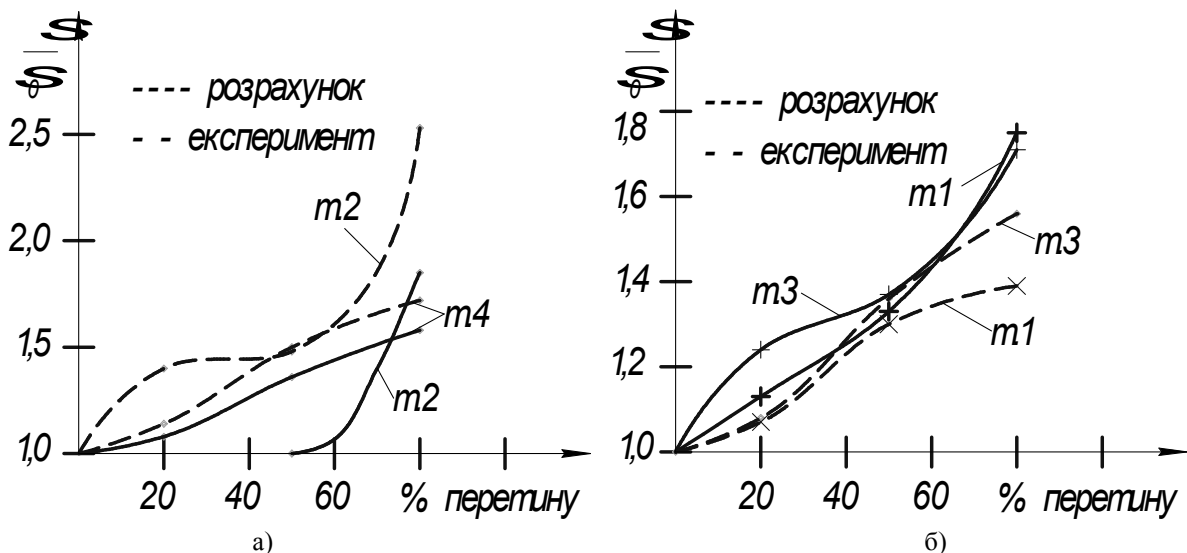







Рисунок 4 - Зміна напружень в елементах несучих систем при розвитку тріщин:  
а – в бездефектних симетричних вузлах; б – в пошкоджених вузлах

Відзначимо добру кореляцію розрахункових і експериментальних результатів (рис. 4, б). Так, при 20-50% пошкодженні перетину похибка не перевищує 12%; при 80% пошкодженні –20%.

Оцінка розвитку тріщин тісно пов'язана з аналізом напружень у нетто-перетинах профілів [13]. У таблиці 1 подано результати розрахунку зміни номінальних напружень в лонжероні (елемент статично невизначуваної рами) та у статично визначеній балці, в поперечних перетинах яких розвиваються тріщини, при

забезпеченні однакового початкового напруженого стану в цих перетинах без наявності дефекту. Номінальні напруження у швелерній балці отримані методами опору матеріалів з використанням пакету символічних перетворень Mathematica 5.0.

Таблиця 1 – Напруження у нетто-перетинах статично визначуваних і невизначуваних балок

Схема пошкодження	Довжина тріщини	Ступінь пошкодження, %	Напруження $\sigma$ , МПа			$\sigma_p / \sigma_b$
			Елемент рами $\sigma_p$		Балка $\sigma_b$	
			ANSYS	Експер. [8]	Mathematica 5.0	
	$l=0$	0	143	149	143	1.0
	$l=b/2$	10	-	-	156.6	-
	$l=b$	20	162	160	192.3	0.84
	$l=b+H/4$	37.5	-	-	268.0	-
	$l=b+H/2$	50	190	194	435	0.44

Аналіз результатів показує, що номінальні напруження  $\sigma_p$  у нетто-перетині елемента рамної конструкції суттєво нижчі від номінальних напружень  $\sigma_b$  статично визначуваної балки, що пов'язано з перерозподілом напружень між елементами рами, а також стисненістю деформацій в рамі.

**Висновок.** Отримані результати уточнюють оцінку напруженого стану у вершині втомної тріщини, яка розповсюджується в елементі статично невизначуваної системи – рамної конструкції мобільної машини.

#### Література

1. Развитие трещин в металлоконструкциях тракторов и других машин / С. С. Дмитриченко, Н. М. Панкратов, Л. П. Шевченко, Н. Г. Троян // Тракторы и сельхозмашины, 1977.-№4.-С.37-39.
2. Ускоренные испытания на усталость несущих систем тракторных прицепов и кормораздатчиков /Л. В. Погорельый., Г. В. Макушин, Э. Я. Филатов, М. С. Тракало // Тракторы и сельхозмашины, 1981.-№10.-С.3-33.
3. Рыбак Т. И. Методы оценки несущей способности и долговечности машин для химической защиты в растениеводстве. - К.: Наук. думка, 1986. – 232 с.
4. Механика разрушения и прочность материалов / Под общ. ред. Панасюка В. В. – Т.4.: Усталость и циклическая трещиностойкость конструкционных материалов / Романив О. Н., Ярема С. Я., Никифорчин Г. Н. и др. – 1990. – 680 с.
5. Статистические закономерности развития трещин в раме трактора с учетом дефектов сварки / Л. Н. Перельштейн, Н. М. Панкратов, В. А. Артемов, А. И. Округ // В сб. : Оценка прочности тракторных конструкций. М.: НПО "НАТИ"-1985. – С.37-47.
6. Підгурський М.І. Закономірності зародження і розвитку поверхневих тріщин малоциклової втоми у зварних з'єднаннях // Вісник ТДТУ, 1997. – Т.2.-№1.-С.50-55.
7. Титаренко В.С. Напружено-деформований стан і довговічність рам напівпричепів / Автореферат канд. дисертації. – Тернопіль: ТДТУ, 2006. – 20 с.
8. Трофимов В.А., Панкратов Н.М. Исследование перераспределения напряжений в элементах рамы при развитии повреждений // Автомобильная промышленность, 1976. – №2. – С. 22-23.
9. Вайншток В. А. Инженерный метод расчета коэффициентов интенсивности напряжений для трещин в статически неопределенных системах // Пробл. прочности, 1987.-№6.-С.46-49.
10. Cheng W. Determination of the mode I stress intensity factors for a edge-cracked beam with fixed ends // Eng. Fract. Mech., 1999.-№63. – P. 193-208.
11. Киселев В.А. Строительная механика. – М.: Стройиздат, 1976. – 511 с.
12. Басов К.А. ANSYS: справочник пользователя. –М.: ДМК Пресс, 2005.- 640 с.
13. Підгурський М.І., Сташків М.Я. Методи визначення КІН для дефектних елементів відкритого профілю // Вісник ТДТУ, 2006. – Т. 2. - №2. – С.92-108.

Одержано 12.07.2007 р.