УДК 539.37/38

ЧИСЛЕННЫЕ МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ ПАРАМЕТРОВ ПРОЧНОСТИ ГЕТЕРОГЕННЫХ МЕТАЛЛОВ

Ю.В. Савченко[1], Е.Г. Науменко[2], А.М. Телипко[3]

[1]старший преподаватель кафедры технологии горного машиностроения, Государственное высшее учебное заведение «Национальный горный университет», Днепр, Украина, E-mail: savcheny@ua.fm

[2]старший преподаватель кафедры строительной, теоретической и прикладной механики, Государственное высшее учебное заведение «Национальный горный университет», Днепр, Украина, E-mail: elena_naumenko71@mail.ru

[3]студент гр. ИМмм-15-1, Государственное высшее учебное заведение «Национальный горный университет», Днепр, Украина, E-mail: s.telipko@mail.ru

Аннотация. Разработана математическая модель, которая позволяет оптимизировать с точки зрения дефектообразования параметры нагружения обрабатываемых материалов, разрушение рассмотрено как метод создания дефектов на субмикроскопическом уровне в гетерогенных средах.

Ключевые слова: математическая модель, гетерогенная среда, дефектообразование, прочность.

NUMERICAL METHODS FOR INVESTIGATION OF STRENGTH PARAMETERS HETEROGENEOUS METALS

Y. Savchenko[1], E. Naumenko[2], O. Telipko[3]

[1]Senior Lecturer, Department of Mining Engineering, National Mining University, Dnepr, Ukraine, e-mail: savcheny@ua.fm

[2]Senior Lecturer, Department of Structural, Engineering and Applied Mechanics, National Mining University, Dnepr, Ukraine, e-mail: elena_naumenko71@mail.ru

[3]Student, National Mining University, Dnipro, Ukraine, e-mail s.telipko@mail.ru

Abstract. Developed a mathematical model, which allows optimizing in terms of defect parameters loading of processed materials, the destruction is considered as a method of creating defects on the submicroscopic level in heterogeneous environments.

Keywords: mathematical model, heterogeneous medium, defect formation, strength.

Введение. Дефицит вольфрама и кобальта, как стратегических материалов, поставил вопрос об использовании инструментального лома из этих материалов для повторного изготовления металлорежущего, разрушающего и формообразующего инструмента. При решении этой проблемы на первый план выступает задача получения качественного сырья, так как первичные материалы и методы их получения оказывают существенное влияние на химический состав, дисперсность металлических порошков /1,2/.

Многочисленными исследованиями /3,4,5,6/ установлено, что прочность взрывного соединения в заметной мере определяется параметрами границы: амплитудной и периодом системы волн, формирующихся в результате соударения двух поверхностей. Однако, исследуемая зависимость между величиной разрушающей нагрузки и параметрами границы носит приближенный, корреляционный характер, причем коэффициент корреляции часто падает до значения 0,6, то есть наблюдается "размытая" зависимость /7/. Очевидно, для характеристики прочности взрывного соединения необходимо ввести определяющий параметр, тесно связанный с механизмом разрушения зоны сварки.

В процессе высокоскоростного соударения двух поверхностей происходит заметное упрочнение в прилегающей зоне и материал по своим механическим свойствам в этой зоне может быть представлен как квазихрупкий, вследствие резкого повышения твердости и падения пластичности.

Цель работы. Разработка математической модели разрушения гетерогенных сред, позволяющей определять критические параметры ударно–волнового нагружения гетерогенных материалов на основе метода конечных элементов.

Материалы и результаты исследований.

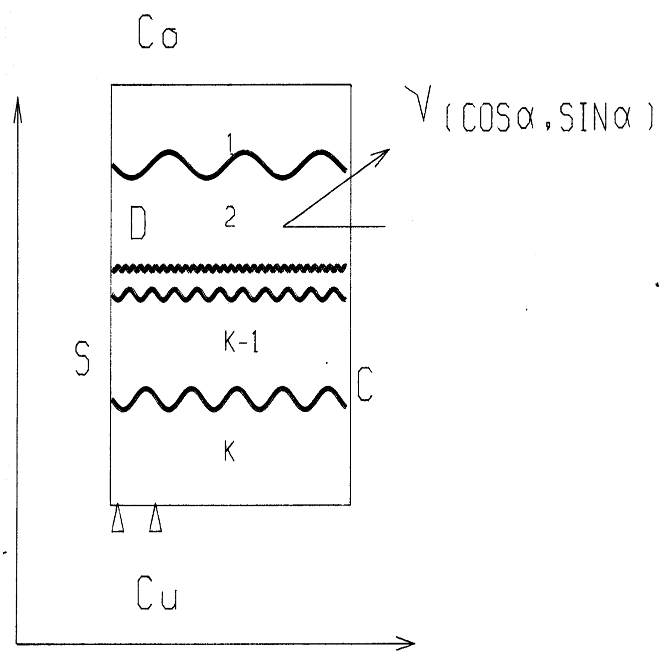

Рис. 1. – Схема

В качестве физического обоснования задачи рассматривается область *D* с границей С неоднородной структуры по толщине. Полагаем, что эту структуру образуют слои различной толщины и жесткости, физико-механические характеристики которых переменны вследствие каких-либо внешних воздействий или технологии изготовления. Количество и порядок расположения слоев произвольны. Таким образом, рассматривается кусочно-неоднородная по толщине область D, в которой зону соединения можно аппроксимировать системой пересекающихся предельных трещин, наклоненных друг к другу под некоторым углом, образование которых соответствует модели Гриффитса-Ирвина-Орована (рис.1) /8/

На тело действуют внешние силы. В области границы $C_u \subset C$ заданы перемещения U_i (кинематические граничные условия)

$$C_u : U_i = q_i \,, \tag{1}$$

в другой области границы $C_\sigma \subset C$ заданы поверхностные силы $P_{\nu i}$ (силовые граничные условия)

$$C_\sigma : P_i = \overline{P_{\nu i}} \,, \tag{2}$$

остальная часть границы свободна от условий

$$C/\left(C_u \wedge C_\sigma\right) : P_i = 0, \tag{3}$$

где ν - вектор направленный по нормали к границе *C* наружу.

Рассматриваемое тело загружено объёмными силами X_i.

Совокупность поверхностей трещин тела D обозначим C_t. Представим C_t в виде объединения двух непересекающихся частей $C_t = C_t^+ \cup C_t^-$, отнеся к C_t^+ поверхность одного берега трещины, а к C_t^- поверхность ее другого берега. Граничные условия на C_t представляют собой условия непроникания, отсутствия трения и неположительности контактного давления.

На основе вариационного принципа можно сформулировать следующую экстремальную задачу: определить поле перемещений $u_i \in D$, доставляющих функционалу

$$J = \iiint_D \sigma_{ij}\varepsilon_{ij} dD - \iiint_D \overline{x_i} u_i dD - \iint_{C_\sigma} \overline{P_{\nu i}} u_i dS \tag{4}$$

значение точной нижней границы на множестве D допустимых перемещений, т.е.

$$\inf_{u_i \in D} J(D) \,. \tag{5}$$

Поскольку в качестве неизвестных параметров принимаются узловые перемещения, формализация МКЭ носит название метода перемещений.

Предположим, что все $C^n \neq 0$, где $C = \cup C_u^n$, т.е. каждое тело D^n, такое что $D = \cup D^n$, имеет закрепленную часть границы. Используя формулировку в виде экстремальной задачи (5), из известной теории нелинейного программирования получим, что в этом случае решение рассматриваемой задачи существует и единственно.

Процедура построения конечномерного аналога вариационной задачи с помощью МКЭ состоит из трех этапов: разбиение области на конечные элементы, построение функций формы конечного элемента, переход к конечномерной задаче /9,10/.

Поскольку функции формы считаются заданными, то все функции Ψ_h определяются фактически своими узловыми значениями, а функционал $J(\Psi_h)$ является по существу функцией $J_h(u_i)$ многих переменных $u_i = (\Psi_{1h}(p_1), \Psi_{2h}(p_1), \Psi_{3h}(p_1), \ldots, \Psi_{3h}(p_s))$. С учетом полученных законов распределения функций по элементу, выполнив необходимое интегрирование по объему и поверхности конечного элемента значение функционала $J(\Psi_h)$ для отдельного элемента можно привести к виду

$$\Delta J = \frac{1}{2}\{u_i\}^T [k]\{u_i\} - \{u_i\}^T \{r_i\}, \tag{6}$$

где $[k]$ - матрица жесткости конечного элемента в местной системе координат;

$\{r_i\}$ - соответствующий вектор узловых сил.

При сборке конструкции из отдельных конечных элементов необходимая совместность их перемещений и углов поворота описывается в общих узлах отображением вектора узловых перемещений $\{u_i\}$ из системы координат конечного элемента k в глобальную систему координат области D с использованием матрицы направляющих косинусов $[\xi]$

$$\{u_i\} = [\xi]\{U_i\}$$

где $\{U_i\}$ - вектор узловых перемещений в глобальной системе координат.

Соответствующие преобразования матрицы жесткости элемента $[k]$ и вектора узловых сил $\{r_i\}$ имеют вид

$$[K] = [\xi]^T [k][\xi]$$
$$\{R_i\} = [\xi]^T \{r_i\} \tag{7}$$

где $[K]$ и $\{R_i\}$ - матрица жесткости и вектор узловых сил в глобальной системе координат. Заметим, что матрица $[K]$ является симметричной и положительно полуопределенной /9,10/.

Полное значение функционала J для всей конструкции получается в результате суперпозиции матриц жесткости и векторов узловых сил, и исключения степеней свободы, соответствующих заданным граничным условиям

$$J(\Psi_h) = \frac{1}{2}\{U\}^T [K]\{U\} - \{U\}^T \{R\}. \tag{8}$$

Условие стационарности функционала (2.4.8) приводит к системе алгебраических уравнений относительно узловых перемещений области D

$$\delta J(\Psi_h) = [K]\{U\} - \{R\} = 0. \tag{9}$$

Таким образом, решение краевой задачи на этапе нагружения сводится к последовательному решению систем линейных алгебраических уравнений (9) с уточняемыми в каждом приближении векторами обобщенных узловых сил $\{R\}$ за счет пластических деформаций в материале конструкции.

Разработанный алгоритм численно реализован для определения напряженно-деформированного состояния зоны взрывного соединения с различными параметрами волнообразной границы в зависимости от коэффициента интенсивности напряжений (КИН) в вершинах интерпретируемых трещин, как функций варьируемых переменных амплитуды, длины волны и угла на основе комбинированного метода конечных и граничных элементов.

В качестве физического обоснования рассматривается двухслойная область, состоящая из слоя нержавеющей стали 12Х18Н10Т и слоя конструкционной стали 22К, зона соединения аппроксимируется системой пересекающихся предельных трещин, наклоненных друг к другу под некоторым углом, образование которых соответствует модели Гриффитса-Ирвина-Орована.

Разработанный алгоритм численно реализован для определения напряженно-деформированного состояния зоны соединения с различными параметрами волнообразной границы в зависимости от коэффициента интенсивности напряжений (КИН) в вершинах интерпретируемых трещин, как функций варьируемых переменных амплитуды, длины волны и угла на основе метода конечных элементов.

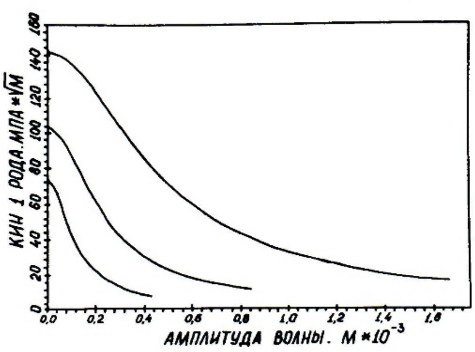

Рис. 2. – Характер изменения коэффициента интенсивности напряжений в зависимости от величины амплитуды волн при деформации отрыва

Анализ полученных зависимостей (рис. 2, 3), показывает, что коэффициент интенсивности для нормальных напряжений (КИН 1-го рода) при одинаковой длине волны и внешней нагрузке с увеличением амплитуды или угла падает, при этом максимального значения прочность соединения достигает при малых значениях амплитуды волны. Прочность соединения при поперечном сдвиге на первом этапе возрастает и в дальнейшем незначительно падает. При росте амплитуды волны происходит резкое увеличение КИН поперечного сдвига (КИН 2-го рода) до некоторого значения, после которого происходит плавное падение.

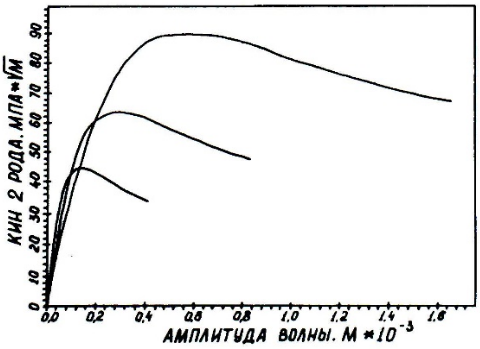

Рис. 3. – Характер изменения коэффициента интенсивности напряжений в зависимости от величины амплитуды волн при деформации сдвига

При одинаковой внешней нагрузке и при увеличении длины волны КИН нормального отрыва и поперечного сдвига увеличиваются при одинаковой амплитуде, следовательно, из двух волн с одинаковой амплитудой прочность выше у волны с большей длиной.

При постоянной длине волны с увеличением амплитуды нормальное раскрытие берегов уменьшается, а сдвиг увеличивается и для каждой конкретной трещины стремится к некоторому значению. При одинаковой амплитуде с увеличением длины волны нормальное раскрытие и поперечный сдвиг берегов увеличиваются.

Вывод. Подход к общей оценке прочности соединения, полученного взрывом, должен основываться на учете характера изменения коэффициентов интенсивности напряжений соответствующих видов деформаций.

Как следует из анализа при значении отношения амплитуды к длине волны равного 0,29 прочность соединения близка к оптимальной, что соответствует относительному сочетанию экстремума значений коэффициентов интенсивности напряжений соответствующий деформациям отрыва и сдвига.

ЛИТЕРАТУРА

1. Iu. Savchenko, A. Gurenko, O. Naumenko. Cutting-edge industrial technology of mining tool manufacturing - Mining of Mineral Deposits. - Volume 10 (2016), Issue 4, pp. 105-110. https://doi.org/10.15407/mining10.04.105

2. Анциферов А.В., Савченко Ю.В. Перспективная технология переработки твёрдых сплавов // Збагачення корисних копалин: наук. -техн. зб. – 2017. –Вип. 67(108). –С. 30–35.

3. Дерибас А.А. Физика упрочнения и сварки взрывом. - Новосибирск: Наука, 1975.

4. Конон Ю.А., Чудновский А.Д., Первухин Л.Б. Сварка взры-вом. - М.: Машиностроение, 1967, 216 с.

5. Баум Ф.А., Станюкович К.П., Шехтер Б.И. Физика взрыва.- М.: Физматгиз, 1959, 800 с.

6. Савченко Ю.В. Моделирование параметров при инициировании плоских и цилиндрических высокомодульных источников энергии / Ю.В. Савченко // Гірнича електромеханіка та автоматика : наук.-техн. зб. – Д. : НГУ, 2016. – Вип. 97. – С. 116 – 120.

7. Панасюк В.В., Саврук М.П., Дацишин А.П. Распределение напряжений около трещин в пластинах и оболочках. - Киев: Наукова думка, 1976 .

8. Irwin GE Fracture // Hanbch der Fhysik - Berlins 1985- s 551-590.

9. Зенкевич 0. Метод конечных элементов в технике. - М.: Мир, 1975, 544 с.

10. Сьярле Ф. Метод конечных элементов в эллиптических задачах. -М.:Мир, 1980, 512 с.

УДК 539.3/.6

СПРОЩЕНА МЕТОДИКА СИЛОВОГО РОЗРАХУНКУ ПЛОСКИХ РАМ ПРИ ВИМУШЕНИХ КОЛИВАННЯХ

Ю.С. Холодняк[1], С.В. Подлєсний[2], С.В. Капорович[3]

[1]кандидат технічних наук, доцент, зав. кафедрою технічної механіки, e-mail: texmex@dgma.donetsk.ua, holodhjak.yuri@gmail.com

[2]кандидат технічних наук, декан факультету автоматизації машинобудування та інформаційних технологій, доцент кафедри технічної механіки, e-mail: sergeypodlesny@gmail.com

[3]кандидат технічних наук, ст. викладач кафедри технічної механіки, e-mail: kaporovych@gmail.com

[1, 2, 3] Донбаська державна машинобудівна академія, м. Краматорськ, Україна

Анотація. Математична модель, що запропонована в роботі, описує коливання невагомої рами з точковою масою при одночасній дії на них вертикальної й горизонтальної гармонійних збурюючих сил. У основу моделі покладений метод сил, що встановлює зв’язок переміщень рами з силами, які на неї діють. Разом з моделлю отримані залежності для обчислення резонансних частот коливальної системи. Виконані розробки дозволяють визначати динамічні характеристики коливального процесу і розраховувати рами на міцність і жорсткість. Методика такого розрахунку реалізована у середовищі Mathcad15. Результати роботи можуть бути корисними студентам і викладачам технічних ВНЗ, також фахівцям - практикам, що виконують силові розрахунки.

Ключевые слова: плоскі рами, вимушені коливання, математична модель, резонансні частоти, силові розрахунки.

SIMPLIFIED METHOD OF POWER CALCULATION OF PLANE FRAMES UNDER CONDITIONS OF FORCED OSCILLATIONS

Yuri S. Kholodnyak[1], Sergey V. Podlesny [2], Svitlana V. Kaporovych[3]

[1]Ph.D., Associate Professor of Technical Mechanics Department, Head of Technical Mechanics Department, e-mail: texmex@dgma.donetsk.ua, holodhjak.yuri@gmail.com