



Кузин Н. О.,
Ляшенко Б. А.,
Ламашевский В. П.

ВЫБОР КРИТЕРИЯ ПРИ ОЦЕНКЕ ПАРАМЕТРОВ ПРОЧНОСТИ ФУНКЦИОНАЛЬНО-ГРАДИЕНТНЫХ КОНСТРУКЦИЙ

Рассмотрено современное состояние проблемы оценки прочности конструкций с ярко выраженной пространственной нелокальностью. Для определения характеристик функционально-градиентных материалов, полученных при модификации в условиях термоциклического ионно-плазменного азотирования, предложены соотношения обобщенного нелокального критерия прочности. Полученные представления анализируются как на модельном уровне с позиций классических критериев прочности, так и с позиций практического использования результатов.

Ключевые слова: функционально-градиентные материалы, нелокальные критерии прочности, термоциклическое ионное азотирование.

1. Введение

Развитие машиностроения требует снижения материалоемкости и массы изделий с одновременным повышением их надежности в условиях возрастающих нестационарных нагрузок.

При этом важнейшей проблемой является обеспечение прочности поверхностных слоев материала деталей, а также сопротивление разрушению в процессе эксплуатации [1].

Традиционные пути решения данных вопросов, предлагающие существенную экономию энергоресурсов за счет разработки аналогов используемых материалов или их модификации, достигли определенных пределов. В этой связи в современной инженерии поверхности сложилось приоритетное направление: разработка и широкое применение многофункциональных покрытий, которые как упрочняют, так и защищают от внешних воздействий поверхности ответственных элементов конструкций [2].

Характерной особенностью строения поверхностных слоев, полученных в результате технологической или эксплуатационной модификации, является четко выраженная неоднородность свойств, которая в общем случае имеет 3-d функционально-градиентные параметры.

Топологическая и размерная неоднородность геометрического строения поверхностных слоев, ярко выраженная локальность передачи нагрузок в условиях контактного взаимодействия, а также гетерогенность свойств материалов, приводит к неоднородности напряженно-деформированного состояния и его существенному влиянию на эксплуатационные характеристики деталей.

На данный момент, как в инженерной практике, так и в исследовательских работах при оценке прочностных параметров функционально-градиентных конструкций чаще всего используется «традиционный подход», не учитывающий особенности поведения материала при наличии концентраторов напряжений различного происхождения, их иерархической вложенности, наличие которых существенно изменяет эксплуатационные па-

раметры изделий по сравнению с однородным напряженным состоянием.

В этой связи является актуальным использование при оценке эксплуатационных параметров конструкций нелокальных критериев прочности, которые позволят учитывать поведения материала под нагрузкой как от его строения, так и от особенности напряженного состояния.

2. Анализ литературных данных и постановка проблемы

Вопрос о важности оценки прочности материала в локальных зонах в области концентрации напряжений, по-видимому, впервые был поднят Серенсенем С. В. [3]. Трудности решения данной проблемы, которая является открытой и на данный момент, связаны с необходимостью одновременного учета как неоднородности распределения напряжений, так и внутренних характеристик связанных со структурой материала в текущий момент времени.

Большинство «традиционных» классических критериев прочности, используемых в механике, не позволяют учитывать нелокальные характеристики поведения конструкции.

Впервые возможность учета влияния структуры материала и ее неоднородности на прочностные параметры конструкции при обобщении классических критериев было предложено в работе [4].

В качестве основы был взят критерий прочности Писаренко-Лебедева:

$$\chi\sigma_i + (1-\chi)\sigma_1 < \sigma_{пр}, \quad (1)$$

который с учетом функции влияния имеет вид:

$$\chi\sigma_i + (1-\chi)\sigma_1 P < \sigma_{пр}. \quad (2)$$

В соотношениях (1) и (2) σ_i — интенсивность напряжений; σ_1 — первое главное напряжение; $\sigma_{пр}$ — предел прочности; P — функция влияния; $\chi = \sigma_p / \sigma_{сж}$, где σ_p — предел прочности при растяжении; $\sigma_{сж}$ — предел прочности при сжатии.

Для определения функции P было предложено следующее соотношение:

$$P = A^{1-3\bar{\sigma}/\sigma_i}, \quad (3)$$

где A — параметр неоднородности структуры; $\bar{\sigma}$ — гидростатическое напряжение.

Отметим, что часто в машиностроительных конструкциях размер зоны структурной неоднородности сопоставим с размером зоны неоднородности напряжений. Этот факт приводит к необходимости учета поведения материала в определенной области конечного размера, а не только в одной точке.

Одним из возможных путей учета влияния структурных параметров на эксплуатационные характеристики является использование интегральных критериев прочности, которые в общем случае описываются неравенством:

$$\langle \sigma_{\text{э}} \rangle_d < \sigma_{пр}, \quad (4)$$

где $\langle \sigma_{\text{э}} \rangle_d$ — осредненное значение эквивалентного напряжения по параметру d .

Размер зоны d полагают константой материала.

В зарубежной литературе для данных критериев используют обозначение ASC (average stress criterion — критерий средних напряжений), а в отечественной называют критериями Нейбера-Новожилова [5].

Существенное упрощение интегральных критериев с учетом априорного предположения о распределении напряжений, в результате чего интегрирование заменяется вычислением напряжения от точки максимума эквивалентных напряжений принято называть критериями прочности по напряжениям в точке или PSC (point stress criterion) [6].

Отметим, что PSC-критерии на данный момент получили достаточно широкое распространение.

Возможность учета в критериях прочности также и изменение свойств материалов зоны предразрушения предложена в FPZ-критериях (fracture process zone).

Ряд моделей FPZ базируется на подходах линейной механики разрушения, с использованием которых исследуется асимптотическое поведение напряжений вблизи вершины трещины [7]. При этом в качестве меры напряженного состояния рассматривается не зависящий от координат коэффициент интенсивности напряжений.

Более сложные FPZ модели учитывают силы сцепления, деградацию упругих постоянных материала, распределение локальной поврежденности в зоне предразрушения [8–10].

Для учета масштабных эффектов механических свойств материала конструкции используют статистические или градиентные модели прочности.

В первом случае характерные размеры структурных параметров учитываются при помощи стохастических распределений, в частности теории Вейбулла [11].

В случае априорного предположения, что наступление предельного состояния определяется как значением

самих напряжений, так и их градиентов, используются градиентные критерии прочности [12, 13]. Отметим, что эти теории также имеют ряд ограничений, особенно если градиенты напряжений обращаются в ноль (например, в случае симметрии области тела).

Отметим, что на данный момент вопрос выбора оптимального нелокального критерия прочности для описания функционально-градиентных конструкций в условиях локальных сосредоточенных контактных распределенных нагрузок является открытым.

3. Объект, цель и задачи исследования

Объект исследования — функционально-градиентные конструкции, которые находятся в условиях локальных контактных нагрузок.

Целью исследования данной работы является выбор нелокальных критериальных соотношений при оценке прочности функционально-градиентных конструкций.

Для достижения поставленной цели необходимо выполнить такие задачи:

1. Введение новых соотношений интегрально-градиентного критерия прочности на основе представления напряженного состояния в форме Писаренко-Лебедева.
2. Исследование поведения функционально-градиентной конструкции в условиях локальных контактных нагрузок на основе классического критерия прочности Писаренко-Лебедева, а также предложенных критериальных соотношений.
3. Анализ результатов по расчету прочности конструкций и выбор аналитических и расчетных методов учета существенной неоднородности как свойств конструкции, так и напряженно-деформированного состояния.

4. Предложение новых критериальных соотношений

Проведенный анализ используемых критериев прочности позволяет сделать следующее обобщение (сформулировать цель данной работы): для более адекватного описания прочности функционально-градиентных конструкций с ярко выраженными параметрами градиентности необходимо сформулировать критерий прочности, который позволяет учитывать «сильные стороны» всех выше описанных как традиционных, так и нелокальных критериев, и, в частном случае, сводится к уже существующим модельным соотношениям.

В этой связи предлагается следующий критерий прочности:

$$\left\{ \begin{array}{l} \frac{1}{(d_1)^n} \int_{\Omega_1} \sigma_{\text{э}} d\Omega < \sigma_{\text{доп}}, \\ \frac{1}{(d_2)^n} \int_{\Omega_2} |\bar{\nabla} \sigma_{\text{э}}| d\Omega < K_{\text{доп}}, \end{array} \right. \quad (5)$$

где $\sigma_{\text{э}}$ — эквивалентные напряжения в форме Писаренко-Лебедева; d_1 , d_2 — характерный размер структурных составляющих, для заданной величины напряжений и их градиента; n — размерность задачи; Ω_1 , Ω_2 — величина области интегрирования напряжений и их градиента; $\bar{\nabla}$ — градиент вектора; $|\dots|$ — модуль вектора;

$\sigma_{\text{доп}}$ — допустимые напряжения; $K_{\text{доп}}$ — допустимые параметры градиента напряжений.

Как видно из соотношения (5), предложенный критерий прочности относится к градиентно-интегральным критериям: без учета второго соотношения системы (5) он превращается в интегральный критерий, а при $\Omega_1 \rightarrow 0$ — в критерий прочности Писаренко-Лебедева.

Условие возникновения разупрочнения материала в функционально-градиентной конструкции представим в виде:

$$F < F_{\text{пр}}, \tag{6}$$

где инвариант представления напряженно-деформированного состояния:

$$F = F\left(\sigma_{\text{экв}}, \langle \sigma_{\text{экв}} \rangle_{\text{инт}}, |\bar{\nabla} \sigma_{\text{экв}}|, \left\langle |\bar{\nabla} \sigma_{\text{экв}}| \right\rangle_{\text{инт}}\right);$$

инвариант предельного значения данных величин:

$$F_{\text{пр}}\left(\sigma_{\text{экв}}^{\text{пр}}, \langle \sigma_{\text{экв}} \rangle_{\text{инт}}^{\text{пр}}, |\bar{\nabla} \sigma_{\text{экв}}|^{\text{пр}}, \left\langle |\bar{\nabla} \sigma_{\text{экв}}| \right\rangle_{\text{инт}}^{\text{пр}}\right).$$

5. Пример использования предложенного критерия. Анализ полученных соотношений

В качестве примера, предложенного для использования критерия, рассмотрим двумерную контактную задачу о локальном силовом фрикционном взаимодействии фрагмента функционально-градиентной конструкции, полученной в результате технологической модификации в условиях ионно-плазменного азотирования (рис. 1).

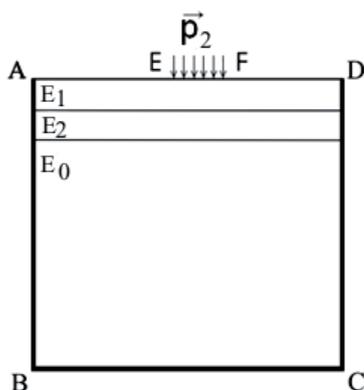


Рис. 1. Постановка задачи для функционально-градиентной конструкции: $ABCD$ — область закрепления материала; EF — область локальных силовых нагрузок; E_0, E_1, E_2 — изменяемые по координатно механические свойства конструкции

Примем, что функционально-градиентное изменение свойств имеет вид:

$$f(l) = f_0 + f_1 e^{-hl}, \tag{7}$$

где f_0, f_1, h — постоянные характерные при образовании покрытий в условиях известной технологической модификации.

Для модификации в условиях термоциклического ионного азотирования в цикле ± 100 °С для стали 40Х13 — $f_0 = 400, f_1 = 600$. Согласно работе [14], величину силовой нагрузки представим в виде параболической функции (рис. 2).

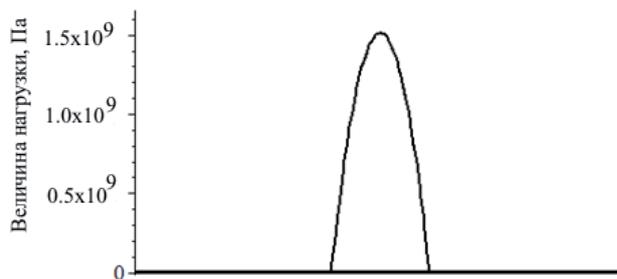


Рис. 2. Вид функции локальной нагрузки

Данную задачу будем решать с использованием метода конечных элементов, схема предложенного программного обеспечения и особенности его работы описаны в работе [15].

Напряженно-деформированное состояние в функционально-градиентной конструкции представлено на рис. 3.

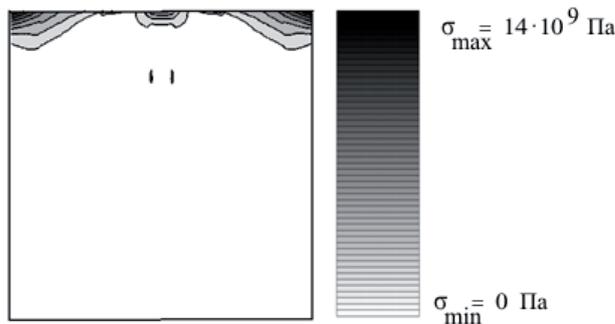


Рис. 3. Распределение напряжений в исследуемом образце

Напряженно-деформированное состояние приводит к разупрочнению материала, которое может быть задано с использованием коэффициента контактной прочности:

$$R = 1 - \frac{\sigma_{\text{э}}}{\sigma_{\text{пр}}}, \tag{8}$$

где $\sigma_{\text{э}}$ — эквивалентные напряжения в форме Писаренко-Лебедева; $\sigma_{\text{пр}}$ — прочностные характеристики конструкции.

Распределение разупрочнения материала согласно соотношения (6) представлено на рис. 4.

При использовании интегрального критерия разупрочнения Писаренко-Лебедева (первое уравнение системы (5)) распределение зоны разупрочнения имеет вид, который показан на рис. 5.

Анализ графических представлений, показанных на рис. 4 и рис. 5, позволяет сделать выводы о том, что использование интегральных критериев дает существенно завышенные по сравнению с локальными критериями характеристики контактной прочности за счет процедуры осреднения (что является недостатком интегральных критериев). Однако следует отметить, что преимуществом интегральных критериев есть их

устойчивость к флуктуациям структуры материала и, как результат, возможность более качественного анализа зон разупрочнения материала.

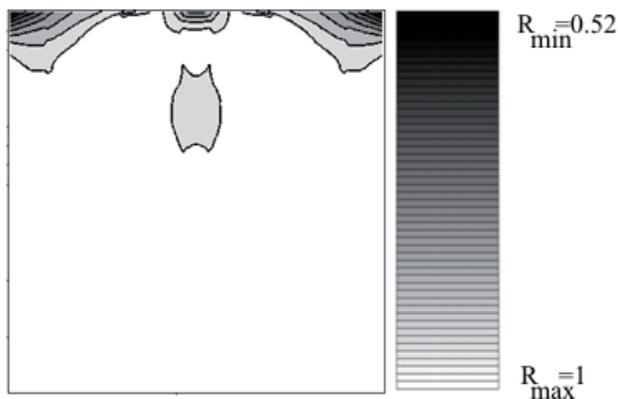


Рис. 4. Распределение зоны разупрочнения в исследуемом образце при использовании критерия Писаренко-Лебедева (R_{\max} — максимальный коэффициент контактной прочности; R_{\min} — минимальный коэффициент контактной прочности)

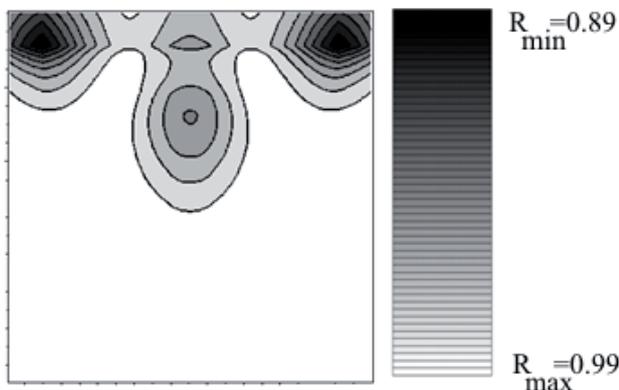


Рис. 5. Распределение зоны разупрочнения в исследуемом образце при использовании интегрального критерия Писаренко-Лебедева

При помощи используемого программного комплекса было найдено распределение градиента напряженного состояния в форме Писаренко-Лебедева (рис. 6).

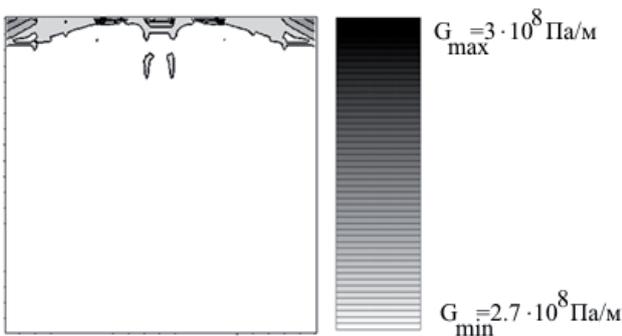


Рис. 6. Распределение градиента напряженного состояния в форме представления Писаренко-Лебедева

Полученные результаты показывают, что распределение градиента напряженного состояния зависит как от функционального распределения свойств материала на поверхности, так и от особенностей локального силового взаимодействия.

Учет только параметров градиента напряженного состояния при анализе прочностных характеристик конструкций на данный момент ограничено состоянием развития градиентных теорий прочности.

6. Обсуждение результатов исследования прочности функционально-градиентных конструкций с использованием классических и нелокальных критериев прочности

Анализ, прогнозирование и расчет прочности поверхностных слоев с учетом внутреннего строения материала на данный момент является актуальной проблемой механики деформируемого твердого тела и машиностроения.

«Классические» — локальные критерии прочности, используемые для расчетов макроконструкций, не позволяют проводить учет структуры материала изделия.

В этой связи, достоинством предложенного критерия является получение зависимости вида разупрочнения конструкций от структурных параметров материала и, как результат, возможность дальнейшей оптимизации напряженно-деформированного состояния в условиях внешнего взаимодействия изменением структуры материала.

Отметим, что недостатком данных подходов, является их малая разработанность и внедрение в практике расчетов машиностроительных конструкций.

Перспективной областью применения предложенных критериальных соотношений является расчет прочности деталей с ярко выраженной неоднородностью свойств, которые находятся в условиях сосредоточенных нагрузок (в частности, в условиях фрикционного взаимодействия).

Возможными путями дальнейшего развития, рассмотренной в работе проблемы, является уточнение на основе экспериментальной механики интегральных и градиентных соотношений вида (5)–(6) или внедрение в современные пакеты САПР методов расчета градиентных конструкций.

7. Выводы

1. Представлен анализ оценки прочностных параметров функционально-градиентных конструкций с помощью нелокальных критериев прочности.
2. На основе совместного использования интегральных и градиентных подходов к оценке прочности предложены новые критериальные обобщения, которые позволяют проводить оценку конструкции в условиях существенной неоднородности как свойств материала, так и напряженно-деформированного состояния.
3. Показана возможность компьютерной реализации разработанных подходов для определения параметров прочности поверхностных слоев функционально-градиентной конструкции, полученных в результате технологической модификации в условиях ионно-плазменного азотирования.
4. С использованием предложенных нелокальных критериев установлено существенное (до 4 раз) повышение контактной прочности поверхностных слоев стали 40Х13 после ионно-плазменного термодиффузионного азотирования в цикле ± 100 °С по сравнению с материалом без технологической модификации.

Литература

1. Трощенко, В. Т. Прочность материалов и конструкций [Текст] / под ред. В. Т. Трощенко. — К.: Академперіодика, 2005. — 1088 с.
2. Харченко, В. В. Оптимизация технологии нанесения покрытий по критериям прочности и износостойкости [Текст] / Б. А. Ляшенко, Е. К. Соловых, В. И. Мирненко и др.; под ред. В. В. Харченко. — К.: Ин-т проблем прочности, 2010. — 193 с.
3. Серенсен, С. В. О гипотезах прочности и расчетных формулах [Текст] / С. В. Серенсен // Вестник инженеров и техников. — 1938. — № 7. — С. 430–433.
4. Лебедев, А. А. Критерий прочности структурно-неоднородных материалов [Текст] / А. А. Лебедев // Проблемы прочности. — 1969. — № 1. — С. 57–60.
5. Whitney, J. M. Stress Fracture Criteria for Laminated Composites Containing Stress Concentrations [Text] / J. M. Whitney, R. J. Nuismer // Journal of Composite Materials. — 1974. — Vol. 8, № 3. — P. 253–265. doi:10.1177/002199837400800303
6. Isupov, L. P. A comparative analysis of several nonlocal fracture criteria [Text] / L. P. Isupov, S. E. Mikhailov // Archive of Applied Mechanics (Ingenieur Archiv). — 1998. — Vol. 68, № 9. — P. 597–612. doi:10.1007/s004190050190
7. Панасюк, В. В. Механика квазихрупкого разрушения материалов [Текст] / В. В. Панасюк. — К.: Наукова думка, 1991. — 416 с.
8. Afaghi-Khatibi, A. An Effective Crack Growth Model for Residual Strength Evaluation of Composite Laminates with Circular Holes [Text] / A. Afaghi-Khatibi, L. Ye, Y.-W. Mat // Journal of Composite Materials. — 1996. — Vol. 30, № 2. — P. 142–163. doi:10.1177/002199839603000201
9. Chang, K.-Y. Damage Tolerance of Laminated Composites Containing an Open Hole and Subjected to Tensile Loadings [Text] / K.-Y. Chang, S. Llu, F.-K. Chang // Journal of Composite Materials. — 1991. — Vol. 25, № 3. — P. 274–301. doi:10.1177/002199839102500303
10. Xia, S. A nonlocal damage approach to analysis of the fracture process zone [Text] / S. Xia, S. Takezono, K. Tao // Engineering Fracture Mechanics. — 1994. — Vol. 48, № 1. — P. 41–51. doi:10.1016/0013-7944(94)90141-4
11. Hoshide, T. Effect of specimen geometry on strength in engineering ceramics [Text] / T. Hoshide, J. Murano, R. Kusaba // Engineering Fracture Mechanics. — 1998. — Vol. 59, № 5. — P. 655–665. doi:10.1016/s0013-7944(97)00124-0
12. Леган, М. А. О взаимосвязи градиентных критериев локальной прочности в зоне концентрации напряжений с линейной механикой разрушения [Текст] / М. А. Леган // Прикладная механика и техническая физика. — 1993. — № 4. — С. 146–154. doi:10.1007/bf00851480
13. Харлаб, В. Д. Градиентный критерий хрупкого разрушения [Текст]: Межвуз. темат. сб. тр. СПбИСИ / В. Д. Харлаб // Исследование по механике строительных конструкций и материалов. — СПб.: Санкт-Петербургский государственный архитектурно-строительный университет, 1993. — С. 4–16.
14. Крагельский, И. В. Основы расчетов на трение и износ [Текст] / И. В. Крагельский, М. Н. Добычин, В. С. Комбалов. — М.: Машиностроение, 1977. — 526 с.
15. Кузін, М. О. Аналіз контактної міцності неоднорідних металічних систем в умовах силової тертьової взаємодії [Текст]: науково-технічний збірник УАД / М. О. Кузін // Наукові записки. — 2011. — № 3(36). — С. 251–258.

ВИБІР КРИТЕРІЮ ПРИ ОЦІНЦІ ПАРАМЕТРІВ МІЦНОСТІ ФУНКЦІОНАЛЬНО-ГРАДІЄНТНИХ КОНСТРУКЦІЙ

Розглянуто сучасний стан проблеми оцінки міцності конструкцій з яскраво вираженою просторовою нелокальністю. Для визначення характеристик функціонально-градієнтних матеріалів, отриманих при модифікації в умовах термоциклічного іонно-плазмового азотування, запропоновані співвідношення узагальненого нелокального критерію міцності. Отримані уявлення аналізуються як на модельному рівні з позицій класичних критеріїв міцності, так і з позицій практичного використання результатів.

Ключові слова: функціонально-градієнтні матеріали, нелокальні критерії міцності, термоциклічне іонне азотування.

Кузін Николай Олегович, кандидат технических наук, доцент, кафедра подвижного состава и пути, Львовский филиал Днепропетровского национального университета железнодорожного транспорта им. акад. В. Лазаряна, Львов, Украина, e-mail: n_kuzin@mail.ru.

Ляшенко Борис Артемович, доктор технических наук, профессор, заведующий отдела упрочнения поверхности элементов конструкций, Институт проблем прочности им. Г. С. Писаренко, Киев, Украина.

Ламашевский Виктор Петрович, кандидат технических наук, старший научный сотрудник, заместитель заведующего отдела механики конструкционных материалов, Институт проблем прочности им. Г. С. Писаренко, Киев, Украина.

Кузін Микола Олегович, кандидат технічних наук, доцент, кафедра рухомого складу та колії, Львівська філія Дніпропетровського національного університету залізничного транспорту ім. акад. В. Лазаряна, Львів, Україна.

Ляшенко Борис Артемович, доктор технічних наук, професор, завідувач відділу зміцнення поверхні елементів конструкцій, Інститут проблем міцності ім. Г. С. Писаренко, Київ, Україна.

Ламашевський Віктор Петрович, кандидат технічних наук, старший науковий співробітник, заступник завідувача відділу механіки конструкційних матеріалів, Інститут проблем міцності ім. Г. С. Писаренко, Київ, Україна.

Kuzin Nikolai, Lviv Branch of the Dnipropetrovsk National University of Railway Transport named after Acad. V. Lazarian, Lviv, Ukraine, e-mail: n_kuzin@mail.ru.

Lyashenko Boris, G. S. Pisarenko Institute for Problems of Strength, Kyiv, Ukraine.

Lamashevsky Viktor, G. S. Pisarenko Institute for Problems of Strength, Kyiv, Ukraine