

МЕТОДИЧЕСКИЙ ПОДХОД И ПРОГРАММА ДЛЯ ОЦЕНКИ НАГРУЖЕННОСТИ, ДЕФЕКТНОСТИ И ДЕГРАДАЦИИ СВОЙСТВ МАТЕРИАЛОВ КОНСТРУКЦИЙ НА ОСНОВЕ ОБРАБОТКИ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ ДАННЫХ

А.С. Чернягин¹

cas@inbox.ru

И.А. Разумовский²

murza45@gmail.com

¹ МГТУ им. Н.Э. Баумана, Москва, Российская Федерация

² Институт машиноведения РАН им. А.А. Благодрава, Москва, Российская Федерация

Аннотация

Рассмотрен экспериментально-расчетный метод оценки нагруженности, дефектности и характеристик деформирования материалов, основанный на математической обработке полученных полей перемещений или деформаций, обусловленный заданным воздействием на исследуемый объект (изменением нагрузки, сверлением малого отверстия, вдавливанием индентора и др.). Метод базируется на определении искомого параметра из условия минимума целевой функции, отражающей расхождение значительных массивов экспериментальных данных и результатов серии расчетов модельных задач на основе метода конечных элементов. Приведены примеры решения модельных задач, связанных с оценкой нагруженности натуральных объектов, размеров поверхностных и подповерхностных дефектов, а также одновременного определения действующих напряжений и предела текучести материала путем обработки полей остаточных перемещений, возникающих после нагружения исследуемой зоны детали сферическим индентором и последующей разгрузки

Ключевые слова

Оценка нагруженности и дефектности, метод конечных элементов, оптико-цифровые методы исследования перемещений, метод индентирования, задача оптимизации

Поступила в редакцию 10.03.2017
© МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2017

В основе предлагаемого метода определения нагрузок, напряжений, размеров дефектов и других характеристик (например, искомого параметра P_j) лежит решение задачи минимизации целевой функции I , которая комплексно отражает расхождение между значениями деформационных откликов e_i^* , зарегистрированных экспериментально (во множестве точек измерений), и e_i , рассчитываемых на основе решения соответствующей модельной краевой задачи (с использованием МКЭ) при текущих значениях искомого параметра P_j . При этом параметры P_j могут быть конкретными физическими, геометрическими величинами или характеризовать законы распределения физических полей по обла-

сти или геометрическую конфигурацию объекта, дефекта. Необходимым условием практической реализации такого подхода, обеспечивающего получение надежного результата, является использование значительных объемов экспериментальной информации в виде полей перемещений или деформаций на поверхности исследуемой области объекта, что обеспечивается использованием современных методов регистрации физических полей, в том числе и на микро- и мезомасштабных уровнях [1–3]. Деформационные отклики, используемые для обработки, могут регистрироваться как вследствие непосредственного нагружения (догружения) исследуемого объекта, так и дополнительного воздействия: удаления материала, нагрева и пр.

Метод реализован в гибком вычислительном комплексе (ВК), в который входят следующие управляющие программы с графическим интерфейсом (рис. 1), реализованные в ПК MATLAB [4, 5]:

- программа обработки экспериментально полученных картин деформационных откликов (ПЭД), с целью определения точек измерения;
- программа решения прямой задачи (ППЗ), т. е. расчет НДС, обусловленного нагружением исследуемой области или другим типом воздействия (высверливание отверстия, вдавливание индентора, образование трещины) на исследуемую область с помощью высокопараметризованных и адаптивных численных моделей исследуемых объектов и алгоритмов решения (ПК ANSYS). Таким образом, обес-

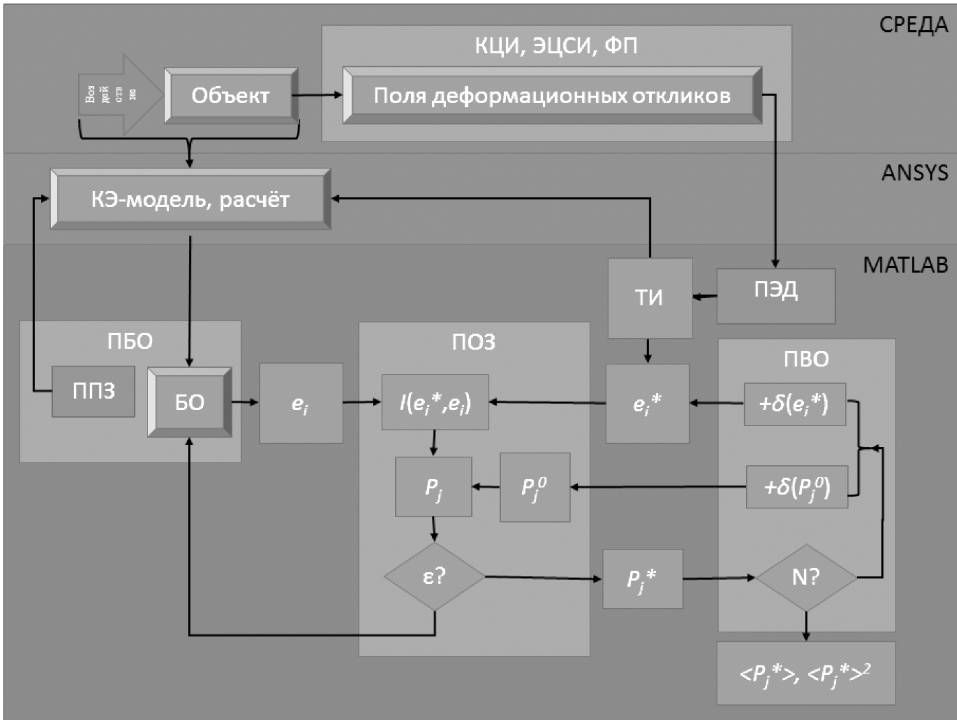


Рис. 1. Принципиальная блок-схема определения параметров НДС, дефектности и деградации свойств материалов на основе математической обработки экспериментальных данных

печивается расчет деформационных откликов e_i при произвольно заданных значениях параметров P_j ;

- программа формирования и использования банка откликов (ПБО), который представляет собой совокупность параметров сплайновых гиперповерхностей или нейронных сетей прямого распространения, аппроксимирующих зависимость $e_i = F(P)$; для этого выполняется серия расчетов соответствующих прямых задач;

- программа решения обратной задачи (ПОЗ) (определение параметров P_j), которая реализует решение задачи минимизации целевой функции $I(e_i^*, e_i)$ при различных настройках и условиях;

- программа, позволяющая проводить оценку влияния отклонений (ПВО) экспериментальных данных, а также устойчивости решения при варьировании числа и зон локализации точек измерений и др.

Таким образом, ВК охватывает все этапы решения реальных прикладных задач с высокой степенью автоматизации этапов, которая обеспечивается во многом благодаря разработанному алгоритму непрерывного обмена данными между программными средами ANSYS и MATLAB.

В работах [6–8] приведены результаты применения методики для оценки (рис. 2):

- нагруженности тонкостенных конструкций с привлечением метода сверления отверстия;

- распределения по глубине пространственной детали существенно неоднородных полей остаточных напряжений;

- комплексного анализа трехмерных элементов конструкций с поверхностной трещиной, заключающегося в одновременном определении глубины трещины b и приложенных нагрузок σ_x , σ_y , на основе обработки полей перемещений, зарегистрированных на поверхности и обусловленных высверливанием малого отверстия в зоне выхода трещины на поверхность;

- размеров a , b полуэллиптической трещины на внутренней поверхности детали на основе обработки экспериментальных данных, зарегистрированных для наружной (доступной) поверхности исследуемого объекта и обусловленных изменением давления в трубопроводе;

- неоднородного по глубине поля остаточных напряжений с помощью дискового выреза.

Дальнейшие разработки рассматриваемого методического подхода и ВК связаны с применением активно развиваемого в последние годы метода индентирования, который является одним из наиболее перспективных способов экспериментально-расчетной оценки физико-механических характеристик поверхностного слоя деталей [9, 10]. Он заключается во вдавливания твердого штампа в поверхность исследуемого объекта в целях образования локальных остаточных полей деформации, которые затем используются для определения искомых параметров состояния. Далее на основе численного эксперимента показана воз-

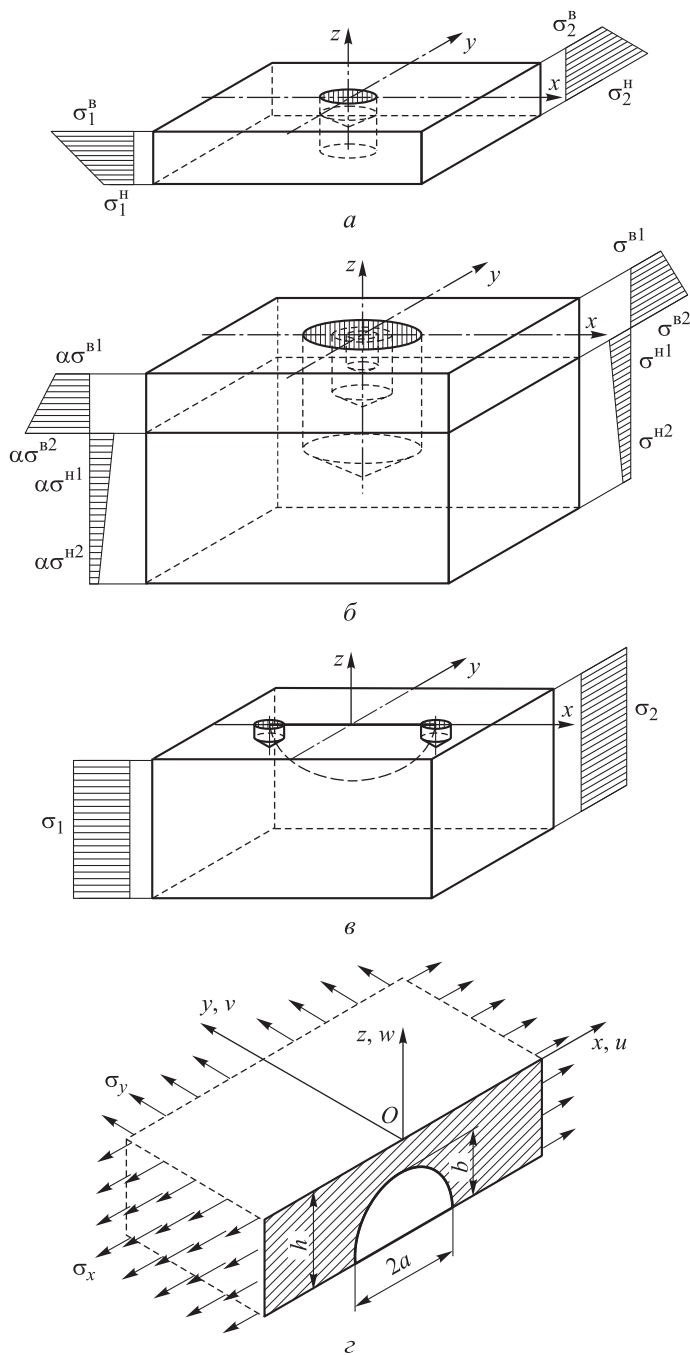


Рис. 2. Примеры практического применения методики по определению:

a — нагруженности тонкостенных элементов конструкций; *б* — разрывных полей остаточных напряжений в биметаллической обечайке методом растачиваемого отверстия; *в* — уровня остаточных напряжений и глубины полуэллиптической трещины на поверхности массивного элемента с зондирующим отверстием в зоне выхода трещины на поверхность; *г* — размеров полуэллиптической трещины на внутренней поверхности трубопровода

возможность применения индентирования в сочетании с ВК для одновременного определения нагруженности объекта и предела текучести материала, который может рассматриваться как показатель деградации его свойств в процессе эксплуатации конструкции (например, вследствие облучения).

Рассмотрим задачу о вдавливании сферического индентора в полупространство из упругопластического материала. Полупространство представляется в виде призматического тела (рис. 3, а), на границах которого действует однородное поле напряжений s_x, s_y , а поведение материала описывается степенным законом с условным пределом текучести σ_* . Шарик диаметром d , выполненный из абсолютно жесткого материала, вдавливается силой F , действующей вдоль оси z .

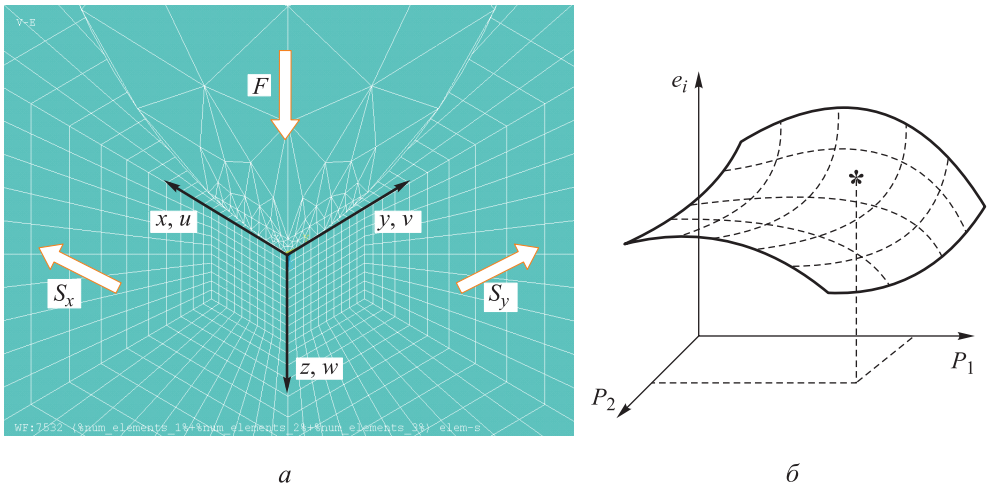


Рис. 3. Конечно-элементная модель тела (а) из упругопластического материала, сплайновая гиперповерхность деформационного отклика e_i (б)

Используется симметричная (плоскости xOz и yOz) конечно-элементная модель (КЭМ) с более плотной сеткой в области контакта тела и шарика (см. рис. 3, а). Расчет остаточного состояния, возникающего после вдавливания индентора с образованием развитых пластических деформаций в полупространстве, может быть выполнен поэтапно:

- а) расчет упругого состояния полупространства от действия s_x и s_y ;
- б) упругопластическое решение контактной задачи о вдавливании индентора с силой F и учетом полученного (см. пункт а) состояния;
- в) решение задачи упругой разгрузки при отведении индентора в неконтактное состояние и наложение данного состояния на состояние, полученное в пункте б, — формирование конечного состояния;
- г) вычитание полей перемещений, соответствующих исходному состоянию (см. пункт а), из полей, соответствующих пункту в, что приводит к получению изменений, обусловленных остаточными упругопластическими деформациями.

В качестве исходных псевдоэкспериментальных данных выступают поля остаточных перемещений u^* , v^* , w^* на поверхности тела, которые получены прямым моделированием с помощью МКЭ при определенных значениях $s_x = s_x^*$, $s_y = s_y^*$ и $\sigma_T = \sigma_T^*$. Значения этих перемещений в точках измерения, расположенных равномерно на линиях равного уровня $u = \text{const}$, $v = \text{const}$, $w = \text{const}$ (аналогов интерференционных полос) в количестве n на линию, и образуют массив данных e^* . В последующем параметры σ_T , s_y (при фиксированных остальных параметрах модели) считаются неизвестными ($P_1 = \sigma_T$, $P_2 = s_y$) и подлежат определению с использованием описанного подхода (см. рис. 1).

Одним из важнейших этапов решения задачи является создание банка откликов. Для различных комбинаций значений параметров $P(l) = \{P_1^l, P_2^l\}$ (где l — номер текущей комбинации) были рассчитаны деформационные отклики $e_i(l)$, на основе которых для каждого e_i построены кубические сплайновые интерполирующие поверхности $e_i = F_i(P_j)$ (рис. 3, б). Совокупность параметров, определяющих эти поверхности, и образует банк откликов. При расчете e_i используется разработанная КЭМ, однако в дальнейшем (процедура поиска параметров состояния на основе минимизации I) отпадает необходимость в ее применении (и длительного решения упругопластической задачи), а вычисление e_i при произвольных значениях параметров P_j проводится достаточно быстро — посредством интерполирования на основе банка откликов. Аналогичное назначение имеют нейронные сети прямого распространения [11], представляющие собой альтернативу сплайновым гиперповерхностям, но предполагающие подбор адекватной топологии и архитектуры сети.

В итоге искомые параметры P_j определяются из условия минимума целевой функции I , в качестве которой принимаются либо среднеквадратическое (I_{rms}), либо максимальное (I_{max}) отклонения между e^* и e_i , рассчитываемые через банк откликов на каждом шаге минимизации I при текущих значениях P_j . Для решения безусловной задачи минимизации (рис. 4, а) используется метод деформированного многогранника (метод Нелдера — Мида).

Проведена оценка влияния погрешности экспериментальных данных на точность и устойчивость процедуры определения параметров P_j при различных условиях решения задачи посредством внесения случайных отклонений δ_e из заданного диапазона в каждую компоненту вектора e^* (см. рис. 1), после чего определены параметры P_j . Повторяя данную процедуру многократно, можно установить разброс отклонений значений P_j по отношению к их истинным значениям P_j^* (рис. 4, б). Кроме того, варьированию также подлежали начальные оценки искомых параметров $P_j^0 = P_j^0 + \delta_p$. Отметим, что принятые при расчетах модельной задачи величины погрешностей эксперимента и объема экспериментальной информации соответствуют возможностям, реализуемым при применении метода электронной цифровой спекл-интерферометрии [1, 3].

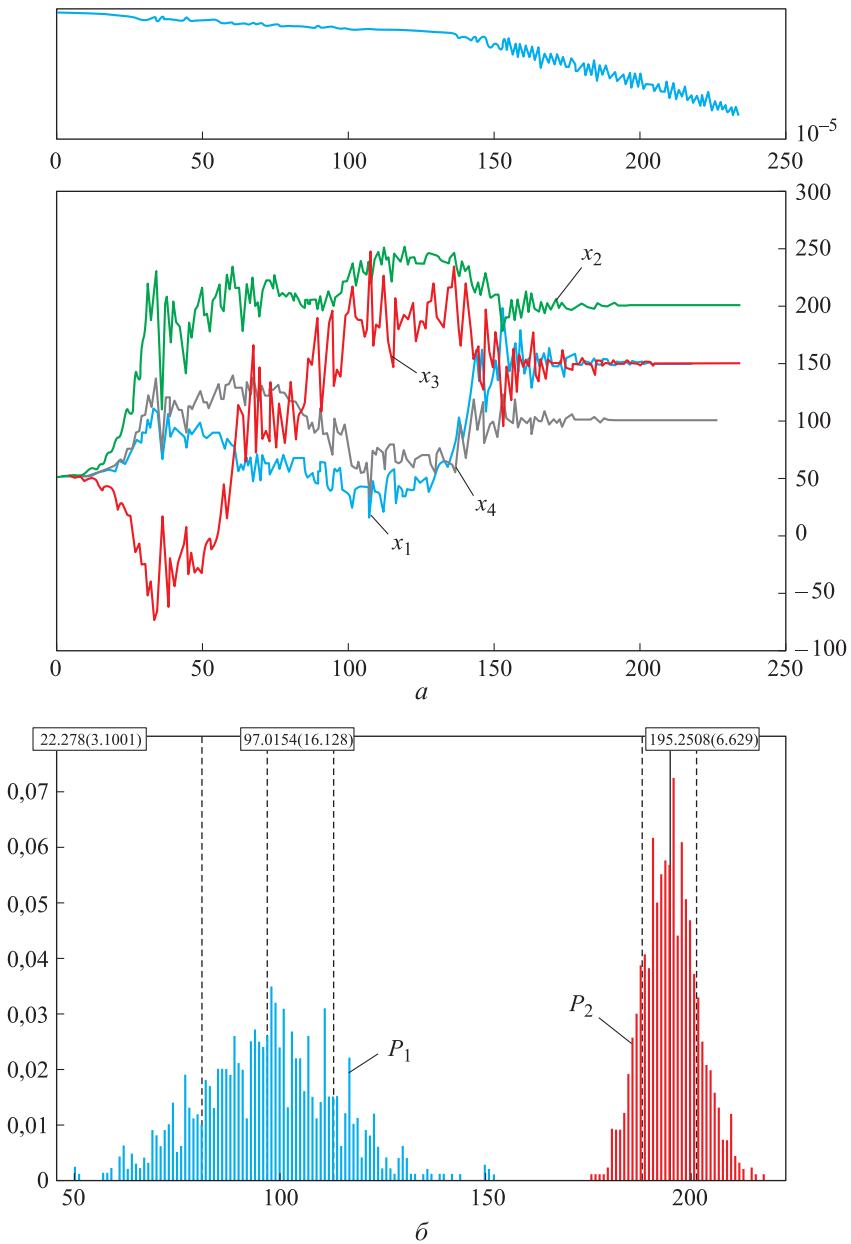


Рис. 4. К процессу решения задачи минимизации (а) и гистограммы разброса величин искомого параметра (б)

В таблице приведены результаты определения параметров состояния в виде математических ожиданий (М) и дисперсий (D) безразмерных величин $\tilde{P}_i = P_i / P_i^*$, полученные для случая $I = I_{rms}$, $\delta_P = \delta_e = 10\%$, $n = 5$ точек/полосу.

Исследования № 1 и № 2 показывают, что для определения σ_T (при s_y , известном с некоторой погрешностью) можно использовать только поле w или одновременно поля u , v , w , — на точность это практически не влияет. Однако,

согласно исследованиям № 3, № 4, для определения s_y (при неточно известном σ_T) следует использовать только поля u, v — в этом случае точность определения значительно выше, чем при использовании всех трех полей перемещений (полное отклонение от точного значения может достигать 15 %). Отметим, что при точном задании σ_T погрешность определения s_y не превышает 1,1 %. Исследование № 5 заключалось в поэтапном определении параметров состояния: сначала по полям перемещений u, v, w было определено значение σ_T , а затем по полям перемещений u, v — значение s_y . В результате погрешность определения σ_T и s_y достигает не более 1,1 и 2,5 %. Исследование № 6 показывает, что возможно также достаточно точно одновременно определять σ_T и s_y по полям u, v, w .

Основные результаты численных экспериментов

Номер исследования	Массив данных e	Параметры состояния			
		\tilde{P}_1		\tilde{P}_2	
		M	D	M	D
1	u, v, w	1,007	0,006	$P_2 = \text{const} = P_2^* \pm \delta_P$	
2	w	1,008	0,005		
3	u, v, w	$P_1 = \text{const} = P_1^* \pm \delta_P$		0,973	0,119
4	u, v			1,000	0,075
5	1) w	1,006	0,005	–	–
	2) u, v	–	–	1,007	0,018
6	u, v, w	1,007	0,004	1,005	0,015

Приведенные результаты в целом справедливы и для целевой функции I_{\max} , отличие от I_{rms} заключается в количестве выполняемых при минимизации итераций, которых требуется немного больше. Следует отметить, что использование I_{rms} обеспечивает получение более точного значения σ_T , тогда как использование I_{\max} — значения s_y .

Таким образом, на основе результатов проведенных исследований можно сделать вывод о возможности применения методики индентирования в сочетании с предложенной методикой математической обработки деформационных откликов для решения задач как самостоятельного определения нагруженности объекта или свойств материала, так и одновременного их определения.

Дальнейшее применение разработанных подхода и ПК в первую очередь будет связано с анализом процессов развития дефектов (трещин) в однородных, структурно-неоднородных материалах, а также волокнистых композитах. В последнем случае в качестве способа регистрации деформационных откликов представляется перспективным применение сетки волоконно-оптических датчиков деформаций, встроенной непосредственно в слои материала натурной конструкции [12].

ЛИТЕРАТУРА

1. *Rastogi P.K.*, ed. Digital speckle pattern interferometry and related techniques. John Wiley & Sons, 2000. 384 p.
2. *Schreier H., Orteu J.-J., Sutton M.* Image correlation for shape. Motion and deformation measurements. Basic concepts, theory and applications. Springer, 2009. 322 p.
3. *Razumovsky I.A.* Interference-optical methods of solid mechanics. Springer, 2011. 180 p.
4. *Разумовский И.А., Чернятин А.С.* Методология и программа для исследования напряженно-деформированного состояния с использованием интерференционно-оптических и численных методов // *Машиностроение и инженерное образование*. 2009. № 4. С. 42–51.
5. *Chernyatin A., Razumovsky I.* Experimental and computational method for determining parameters of stress-strain state from the data obtainable by interference optical techniques // 14th Int. Conf. on Experimental Mechanics. 2010. Vol. 6. P. 45003.
DOI: 10.1051/epjconf/20100645003
URL: https://www.epj-conferences.org/articles/epjconf/abs/2010/05/epjconf_ICEM14_45003/epjconf_ICEM14_45003.html
6. *Разумовский И.А., Чернятин А.С.* Определение нагруженности и дефектности элементов конструкций на основе минимизации расхождения между экспериментальными и расчетными данными // *Заводская лаборатория. Диагностика материалов*. 2012. № 1-1. С. 71–78.
7. *Chernyatin A.S., Razumovskii I.A.* Methodology and software package for assessment of stress-strain state parameters of full-scale structures and its application to a study of loading level, defect rate and residual stress level in elements of NPP equipment // *Strength of Materials*. 2013. Vol. 45. No. 4. P. 506–511. DOI: 10.1007/s11223-013-9486-6
URL: <https://link.springer.com/article/10.1007/s11223-013-9486-6>
8. *Чернятин А.С., Разумовский И.А.* Последовательно углубляемый дисковый разрез — индикатор остаточных напряжений в пространственных телах // *Проблемы машиностроения и надежности машин*. 2015. № 5. С. 93–102.
9. *Шабанов В.М.* Сопротивление металлов начальной пластической деформации при вдавливании сферического индентора // *Заводская лаборатория. Диагностика материалов*. 2008. Т. 74. № 6. С. 63–69.
10. *Ковалев А.П.* Основные закономерности вдавливания сферического индентора и оценка физико-механических свойств поверхностного слоя деталей // *Упрочняющие технологии и покрытия*. 2007. № 1. С. 36–42.
11. *Хайкин С.* Нейронные сети: полный курс / пер. с англ. М.: Вильямс, 2006. 1104 с.
12. *Джексон В.Г.* Новейшие датчики. М.: Техносфера, 2007. 384 с.

Чернятин Александр Сергеевич — канд. техн. наук, доцент кафедры «Прикладная механика» МГТУ им. Н.Э. Баумана (Российская Федерация, 105005, Москва, 2-я Бауманская ул., д. 5. стр. 1).

Разумовский Игорь Александрович — д-р техн. наук, заведующий лабораторией Института машиноведения РАН им. А.А. Благонравова (Российская Федерация, 101990, Москва, Малый Харитоньевский переулок, д. 4).

Просьба сослаться на эту статью следующим образом:

Чернятин А.С., Разумовский И.А. Методический подход и программа для оценки нагруженности, дефектности и деградации свойств материалов конструкций на основе обработки экспериментальных данных // Вестник МГТУ им. Н.Э. Баумана. Сер. Машиностроение. 2017. № 5. С. 64–74. DOI: 10.18698/0236-3941-2017-5-64-74

**METHODOLOGICAL APPROACH AND SOFTWARE FOR LOADS,
DEFECTS AND DEGRADATION OF MECHANICAL CHARACTERISTICS
IN STRUCTURAL MATERIALS, BASED ON PROCESSING
EXPERIMENTAL DATA**

A.S. Chernyatin¹

cas@inbox.ru

I.A. Razumovskiy²

murza45@gmail.com

¹ Bauman Moscow State Technical University, Moscow, Russian Federation

² Mechanical Engineering Research Institute of the Russian Academy of Sciences (IMASH RAN), Moscow, Russian Federation

Abstract

The article deals with the basics of an experimental computational method to assess of loads, defects and deformation characteristics of materials based on mathematically processing experimentally obtained displacement or strain fields caused by exposing the object under consideration to certain factors (varying the load, drilling a small hole, indentation etc.). We base our method on determining the parameters desired so as to minimise the objective function describing the discrepancy between considerable arrays of experimental data and the results of a series of finite element computations aimed at solving model problems. We supply example solutions of model problems dealing with determination of loads and dimensions of surface and subsurface defects on full scale objects, as well as with simultaneously determining existing stresses and the yield point in a material by means of processing residual displacement fields caused by using a spherical indenter to the load workpiece zone under consideration and subsequent unloading

Keywords

Load and defect assessment, finite element method, optical digital methods of displacement investigation, indentation method, optimisation problem

REFERENCES

- [1] Rastogi P.K., ed. Digital speckle pattern interferometry and related techniques. John Wiley & Sons, 2000. 384 p.
- [2] Schreier N., Orteu J.-J., Sutton M. Image correlation for shape. Motion and deformation measurements. Basic concepts, theory and applications. Springer, 2009. 322 p.
- [3] Rasumovsky I.A. Interference-optical methods of solid mechanics. Springer, 2011. 180 p.

- [4] Razumovskiy I.A., Chernyatin A.S. Methodology and software for analysis of stress-strain state by means of interference optical and numerical techniques. *Mashinostroenie i inzhenerное образование* [Mechanical Engineering and Engineering Education], 2009, no. 4, pp. 42–51 (in Russ.).
- [5] Chernyatin A., Razumovsky I. Experimental and computational method for determining parameters of stress-strain state from the data obtainable by interference optical techniques. *14th Int. Conf. on Experimental Mechanics*, 2010, vol. 6, pp. 45003.
DOI: 10.1051/epjconf/20100645003
Available at: https://www.epj-conferences.org/articles/epjconf/abs/2010/05/epjconf_ICEM14_45003/epjconf_ICEM14_45003.html
- [6] Razumovskiy I.A., Chernyatin A.S. Determination of loading and defects in structural elements through minimization of the differences between experimental and calculated data. *Zavodskaya laboratoriya. Diagnostika materialov* [Industrial Laboratory. Materials Diagnostics], 2012, no. 1-1, pp. 71–78 (in Russ.).
- [7] Chernyatin A.S., Razumovskiy I.A. Methodology and software package for assessment of stress-strain state parameters of full-scale structures and its application to a study of loading level, defect rate and residual stress level in elements of NPP equipment. *Strength of Materials*, 2013, vol. 45, no. 4, pp. 506–511. DOI: 10.1007/s11223-013-9486-6
Available at: <https://link.springer.com/article/10.1007/s11223-013-9486-6>
- [8] Chernyatin A.S., Razumovskiy I.A. A sequentially deepened disc cut as an indicator of residual stresses in spatial bodies. *Journal of Machinery Manufacture and Reliability*, 2015, vol. 44, no. 5, pp. 471–478. DOI: 10.3103/S1052618815050064
Available at: <https://link.springer.com/article/10.3103/S1052618815050064>
- [9] Shabanov V.M. Metal resistance to initial plastic strain upon indentation of spherical indenter. *Zavodskaya laboratoriya. Diagnostika materialov* [Industrial Laboratory. Materials Diagnostics], 2008, vol. 74, no. 6, pp. 63–69 (in Russ.).
- [10] Kovalev A.P. The basic laws of cave-in spherical indenter and the estimation of physicomaterial properties of the surface layers of parts. *Uprochnyayushchie tekhnologii i pokrytiya* [Strengthening Technologies and Coatings], 2007, no. 1, pp. 36–42.
- [11] Haykin S. Neural networks: A comprehensive foundation. Prentice Hall, 1998 (Russ. ed.: Neyronnye seti: polnyy kurs. Moscow, Vil'yams Publ., 2006. 1104 p.).
- [12] Jackson R.G. Novel sensors and sensing. CRC Press, 2004. 512 p. (Russ. ed.: Noveyshie datchiki. Moscow, Tekhnosfera Publ., 2007. 384 p.).

Chernyatin A.S. — Cand. Sc. (Eng.), Assoc. Professor, Applied Mechanics Department, Bauman Moscow State Technical University (2-ya Baumanskaya ul. 5, str. 1, Moscow, 105005 Russian Federation).

Razumovskiy I.A. — Dr. Sc. (Eng.), Head of Laboratory, Mechanical Engineering Research Institute of the Russian Academy of Sciences (IMASH RAN) (Malyy Khariton'evskiy per. 4, Moscow, 101990 Russian Federation).

Please cite this article in English as:

Chernyatin A.S., Razumovskiy I.A. Methodological Approach and Software for Assessing Loads, Defects and Degradation of Mechanical Characteristics in Structural Materials, Based on Processing Experimental Data. *Vestn. Mosk. Gos. Tekh. Univ. im. N.E. Baumana, Mashinostr.* [Herald of the Bauman Moscow State Tech. Univ., Mech. Eng.], 2017, no. 5, pp. 64–74.
DOI: 10.18698/0236-3941-2017-5-64-74