

ОЦЕНКА ПОВРЕЖДЕНИЯ ТС С ТОЧКИ ЗРЕНИЯ СЛОЖНОЙ ТЕХНИЧЕСКОЙ СИСТЕМЫ С СОБСТВЕННОЙ СТРУКТУРОЙ

Тупицын И.И.¹, к.т.н. Зубрицкий С.Г.¹, к.т.н. Красавин П.А.²

¹Государственный научный центр Российской Федерации ФГУП «НАМИ», Москва, Россия

²Московский автомобильно-дорожный государственный технический университет (МАДИ), Москва, Россия
igor.tupitsyn@nami.ru

В статье в виде алгоритма оценки диагностических параметров (вероятных связей) рассматривается часть исследования послеремонтной надежности транспортных средств с точки зрения представления их в качестве сложной технической системы. На сегодняшний день проблема надежности транспортных средств в эксплуатации законодательно поставлена на контроль президентом РФ и входит в стратегию по обеспечению безопасности дорожного движения до 2023 года, являющегося частью Национального проекта «Безопасные дороги».

Исходными данными исследования на этапе оценки вероятных связей являются параметры движения транспортного средства в предаварийный интервал времени и напряжение, действующее в месте контакта исследуемого объекта, полученное исходя из этих параметров. Основным методом оценки является подсчет ячеек разного типа по методу сеток в зависимости от характера повреждения транспортного средства. В целях декомпозиции места контакта на ячейки разного типа рекомендуется использовать соответствующие поверенные средства измерений и аттестованное оборудование: дефектоскопы и прочее. Для удобства применения алгоритма и снижения погрешности использования приведенной математической модели в комплексной оценке надежности транспортных средств в статье приводится определение приведенного объема и поправочных коэффициентов.

Выходными данными алгоритма оценки диагностических параметров являются уточненные значения напряжений в месте контакта исследуемого объекта, а также детальная картина распределения энергии деформации в объекте. В результате, полученные величины могут быть использованы для дальнейшей оценки изменения регламентированных значений свойств транспортного средства, установленных изготовителем и контролируемых в рамках системы предупреждения отказов или технического осмотра.

Ключевые слова: остаточный ресурс, транспортное средство (ТС), оценка повреждения, дорожно-транспортное происшествие (ДТП).

Для цитирования: Тупицын И.И., Зубрицкий С.Г., Красавин П.А. Оценка повреждения ТС с точки зрения сложной технической системы с собственной структурой // Известия МГТУ «МАМИ». 2021. № 3 (49). С. 42–48. DOI: 10.31992/2074-0530-2021-49-3-42-48

Введение

Оценку изменившихся свойств транспортного средства (ТС) в результате повреждения необходимо начинать с анализа его (ТС) диагностических параметров. Очевидно, что агрегаты и узлы ТС находятся в постоянном/циклическом сопряжении и взаимодействии в функционирующей замкнутой сложной технической системе. Именно поэтому важно оценить все возможные связи элементов этой системы для выявления нарушений в ее структурных составляющих, которые могли привести к изменению свойств всего объекта в целом. Определить изменения функциональ-

ных зависимостей в работе отдельных элементов поможет анализ вероятных связей.

В связи с этим целью исследования является рассмотрение зоны повреждений объекта с точки зрения покомпонентного анализа максимально возможным образом.

Алгоритм оценки диагностических параметров (вероятных связей)

Для осуществления анализа и достижения поставленной цели необходимо графическое представление транспортного средства в специализированных программах, например, *Audatex* или *SilverDat*, которым определяем

предполагаемые затронутые в ДТП элементы и системы по глубине зоны повреждений путем наложения соответствующих графических областей на полученные на этапе алгоритма оценки повреждений (поглощенной энергии) формы повреждений [1].

Исходя из этого мы получим несколько вариантов клеток в сетке – классов, представленных на рис. 1: пустая клетка, частично заполненная клетка, полностью заполненная клетка. Теперь рассмотрим приведенную глубину повреждений, равную деформации изначальной площади взаимодействия транспортных средств в части исследуемого объекта. Из рис. 1 следуют два графических представления, описывающие состояние исследуемой площади исходного вида транспортного средства и послеаварийного, приведенные к единой элементарной площади. Исходя из логики перехода данной площади из первого состояния во второе мы можем рассчитать объем полученного повреждения. Для этого рассчитаем по формуле (исходное состояние) изначальный объем исследуемой области (1):

$$V_{\text{исх.}} = \left[\sum N_{\text{клеток}} - \sum N_{\text{пустот}} \right] \cdot K_{\text{масштаба}} \cdot \quad (1)$$

При этом $K_{\text{масштаба}}$ – коэффициент, включающий в себя геометрическую разницу между сеткой и реальным размером транспортного средства, а также средний размер агрегатов, отложенный по вертикали в исследуемой площади. Простыми словами, приведенный исходный объем подсчитываем исходя из количества элементарных кубиков.

Из поврежденного состояния следуют три изучаемые области, разделенные линией объемного повреждения. Тогда общая площадь

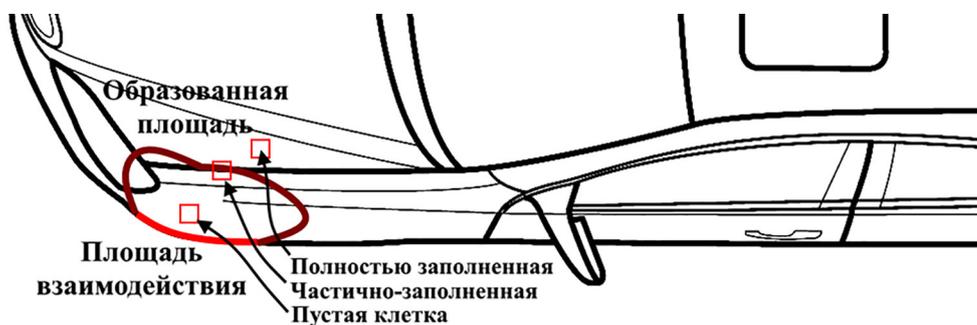


Рис. 1. Распространение импульса удара на компоненты транспортного средства.
 Виды клеток оценочной сетки

Fig. 1. Propagation of the impact pulse to the components of the vehicle.
 Types of cells of the evaluation grid

сетки будет равна сумме площадей, для простоты приведенная к коэффициенту масштаба (2):

$$\frac{S_{\text{сетки}}}{K_{\text{масштаба}}} = \sum N_{\text{дефектов}} + \sum N_{\text{остатка}} + \quad (2)$$

$$+ S_{\text{скрыт.}} = \varepsilon_{ik} + \sum N_{\text{остатка}},$$

где N – количество клеток конкретного вида.

Для простоты оценки клетки на стыке (через которые проходит линия объемного повреждения) засчитываются той или иной площади исходя из соотношения площадей их частей. Очевидно, что тензор деформаций разделится на видимые и невидимые деформации. При этом деформации, которые невозможно определить невооруженным взглядом (невидимые), будут являться пластическими – объем не изменяется при изменении формы [2], то есть общее количество клеток будет складываться из суммы поврежденных клеток и оставшихся клеток. Соответственно, при разложении тензора деформации мы получим девiator и шаровой тензор, равный пластической деформации. Исходя из второго (поврежденного) состояния выделим поврежденную область. При объединении полученного значения со свойствами первого (исходного) состояния получим приведенное значение объема деформации с учетом конкретной специфики взаимодействия элементарных точек внутри заданной площади (3):

$$V_{\text{прив.}} = \left[\sum N_{\text{клеток}} - \sum N_{\text{пустот}} \right] \times \quad (3)$$

$$\times \frac{\sum N_{\text{дефектов}} + S_{\text{скрыт.}}}{\sum N_{\text{остатка}}} \cdot K_{\text{масштаба}} \cdot$$

При этом ясно, что в реальном случае второе состояние будет отличаться от того,

что представлено на рис. 1. Здесь будет идти речь о деформации всей системы – площади по неизвестному случайному закону. Тогда именно соотношением составляющих ее частей можно оценить характер протекания деформации, что будет наиболее важным для дальнейшего расчета. Именно поэтому в дальнейшем будем рассматривать вместо объема деформации – приведенный объем деформации, в котором физически заложено взаимодействие деформируемых и незатронутых элементарных ячеек. Также стоит отметить, что в теории надежности часто используют отношения количеств поврежденных и неповрежденных элементов [3]. Данный принцип применен и здесь, во втором члене уравнения, а также фиксируется в таблице вероятных связей для дальнейшего построения логических связей с затрагиваемыми узлами/агрегатами и их свойствами.

Теперь рассмотрим более подробно $S_{\text{СКРЫТ}}$. Для его расчета проведем анализ поврежденной области транспортного средства по линии объемной деформации с помощью специализированных средств измерений. Анализ внутренних сдвиговых явлений в кристаллической решетке, вызывающих появление остаточных (пластических) деформаций, можно проводить с помощью оборудования для проведения металлографии и дефектоскопов. Основной задачей является определение площади рядом с линией объемной деформации, которая подвержена изменению кристаллической

решетки. Таким образом, площадь скрытых дефектов (пластических) в безразмерном виде будет равна отношению рассчитанной площади, в пределах которой обнаружено нарушение кристаллической решетки к коэффициенту масштаба (4):

$$S_{\text{СКРЫТ}} = \frac{\sum N_{\text{КЛЕТОК}} a \cdot b \cdot c}{K_{\text{МАСШТАБА}}}, \quad (4)$$

где a , b и c – геометрические размеры области в каждой клетке N по линии объемной деформации, подверженной пластической деформации.

Стоит отметить, что вертикальная составляющая (третья координата) элементарной площадки в коэффициенте масштаба, равная константе, не равна c . Таким образом, мы получаем безразмерную величину пластической деформации в двумерном пространстве с учетом заложенного соотношения реальной вертикальной составляющей деформации к математически заложенной, равной константе (размер элементарной площади удара, определяемый на первых этапах, как указано на рис. 2).

Перекося сетки (искажение) в результате ДТП будет обосновываться накоплением материала пластических деформаций. Тогда приведение обеих сеток к единой неискаженной системе координат будет возможно при учете клеток с пластическими деформациями (рис. 3).

Данный приведенный объем можно учитывать для расчета интенсивности дорожно-транспортного происшествия [4]. Физический смысл такого подхода заключается в том,

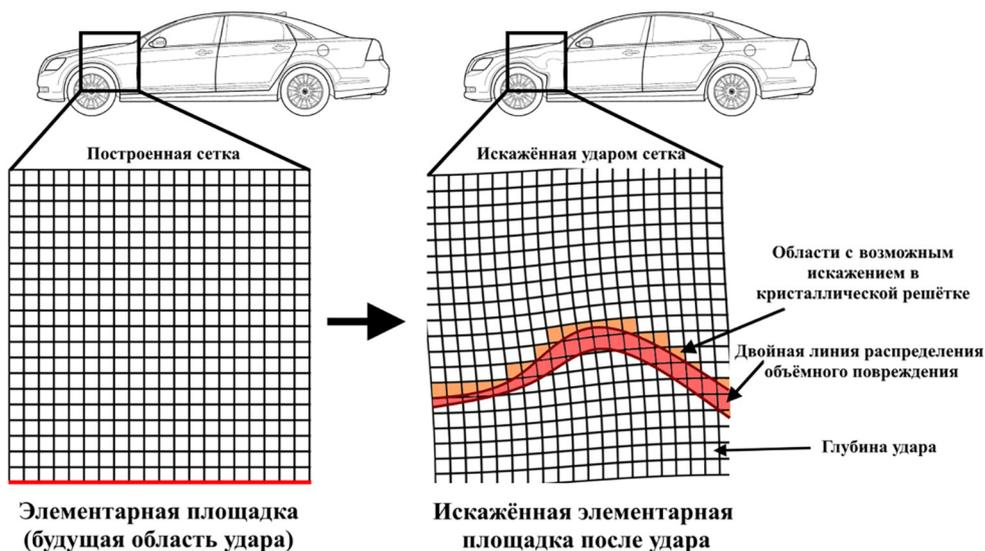
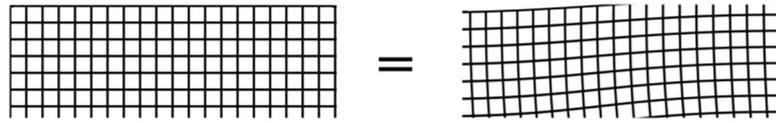


Рис. 2. Элементарные площадки

Fig. 2. Elementary platforms



при условии, что

Двойная линия распределения объёмного повреждения + Области с возможным искажением в кристаллической решётке

Рис. 3. Учет искажения сетки

Fig. 3. Evaluation of grid distortion

что интенсивность повреждения неизбежно приводит к определенному соотношению областей с повреждениями и без них по заданной функциональной зависимости в рамках заданной сетки. Исходя из этого, интенсивность образования деформации пропорциональна поглощаемой энергии с поправкой на количественную составляющую сминаемого материала (как уже было отмечено ранее, свойства материала, определяемые тензором упругости, а также характер снижения воздействия, определяемый условиями движения, уже учтены в понятии интенсивности [4]).

Разложим рассчитанные значения напряжений и измеренные значения деформаций (перемещений) на ряд напряжений для каждой клетки, пользуясь функцией интенсивности (по глубине поглощения энергии) и функцией, определяющей линию объемной деформации (по ширине площади взаимодействия транспортных средств). При этом:

$$f(\sigma) = f(I) \times \left[\frac{\sum_{i=1}^n (\sum_n N_{\text{КЛЕТОК}} - \sum_n N_{\text{ПУСТОТ}})}{\sum_{i=1}^m N_{\text{КЛЕТОК}} - \sum_{i=1}^m N_{\text{ПУСТОТ}}} \right], \quad (5)$$

где n – номер текущего ряда клеток; m – полное количество рядов.

Для упрощения и возможности расчета раскроем $f(I)$, тогда получим следующую зависимость:

$$\sigma_n = \frac{[\sigma_{K1n} + \sigma_{K2n} + \sigma_{K3n}]}{3}, \quad (6)$$

$$\sigma_{K1n} = \sigma \cdot K_{1n}, \quad \sigma_{K2n} = \sigma \cdot K_{2n}, \quad \sigma_{K3n} = \sigma \cdot K_{3n},$$

где K_1 – коэффициент, учитывающий количественную составляющую материала в сетке, препятствующего протеканию деформации и его свойства (оценка производится по каждой клетке); K_2 – коэффициент, учитывающий затухание энергии в однородной среде (оценка про-

изводится по каждому ряду – строке); K_3 – коэффициент, учитывающий снижение энергии, затрачиваемой на деформацию, за счет условий движения (оценка производится по каждому ряду – строке).

Для K_1 используем уже приведенную выше зависимость, но с уточнением по свойствам материала в конкретной клетке. K_2 и K_3 – коэффициенты, которые переносят характер конкретных процессов (указаны ранее) на распределение напряжений в исследуемой площадке. Это можно сделать потому, что данные процессы непосредственно вызывают изменение исследуемой площадки (характер протекания ее деформации). Для этого рассчитаем ключевые точки (значения K^*) по приведенным функциональным зависимостям. Ключевым элементом будет продолжительность (время) процесса ДТП. Разделим это время на одинаковые отрезки, равные количеству рядов. Тогда $n = n^*$ и $m = m^*$. В дальнейшем, введем дополнительный учет неравномерности напряжения от времени протекания аварии. Приведем значения коэффициентов в рамках заданной сетки (7.1, 7.2, 7.3):

$$K_{1n} = \frac{\sum_{i=1}^n \left[\sum_1^z C_l \cdot (N_l - N_l^{\text{ПУСТОТ}}) \right]}{\sum_{i=1}^m \left[\sum_1^z C_l \cdot (N_l - N_l^{\text{ПУСТОТ}}) \right]}, \quad (7.1)$$

$$K_{2n} = \frac{K_{2n}^*}{\sum_1^m K_{2n}^*}, \quad K_{3n} = \frac{K_{3n}^*}{\sum_1^m K_{3n}^*}, \quad \text{т.т.т.}, \quad (7.2, 7.3)$$

где l – текущая клетка ряда; z – количество клеток в ряде n ; C_l – тензор упругости для материала клетки; $N_l - N_l^{\text{ПУСТОТ}}$ – количество материала в клетке, значение которого находится в диапазоне от 0 до 1.

Понятно, что если не учитывать свойства материала, приняв последний однородным, то данный коэффициент можно упростить и свести его к ранее приведенному – таким об-

разом, производить учет количества материала не по клеткам, а по рядам.

При графическом отображении характера протекания процессов ДТП его можно представить следующим образом (рис. 4).

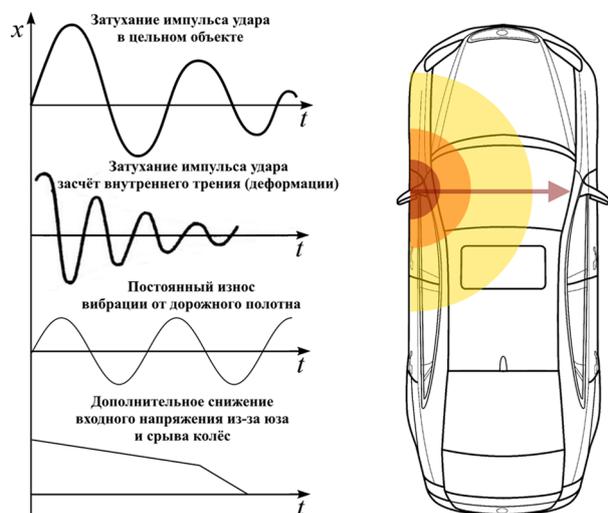


Рис. 4. Графическое отражение глубины поглощения энергии и ее распределения

Fig. 4. Graphical reflection of the depth of energy absorption and its distribution

Приведенные коэффициенты позволяют учесть характер снижения входного напряжения исходя из представленных на рисунке процессов аварии. Стоит отметить, что зависимость постоянного износа рассматривается отдельно в соответствующем алгоритме [4]. Также значение импульса удара, равное эффекту распространения энергии в цельном объекте заданной (постоянной) плотности имеет низкие значения, и, в большей степени, позволяет производить учет направления этой волны (или направление удара/деформации).

Возвращаясь к коэффициентам, такое решение позволяет распределить напряжения по рядам – строкам сетки с одновременным учетом свойств материала в отдельных клетках. Для снижения погрешности введем поправочный коэффициент, учитывающий отклонение расчетной величины напряжения от изначально используемой (8):

$$K_{\text{ПОПРАВ.}} = \frac{\left| \sum_1^m \sigma_n - \sigma \right|}{\sigma}. \quad (8)$$

Полученный коэффициент понадобится позже для дальнейших расчетов в целях снижения их погрешности. Но для оценки превышения заданных пределов напряжений в клет-

ках проведем дополнительное распределение рассчитанного напряжения (в рядах – строках) в рядах – столбцах. Это вызвано тем, что энергия аварии переходит в напряжение, распределяющееся по элементарной площадке (сетке), вызывая деформацию (именно, при делении по столбцам), поэтому при переводе оценочной системы из рядной в клеточную ($\sigma_n - \sigma$) ее необходимо учитывать (9).

$$\sigma_l = \sigma_n \cdot \frac{\sum N_{\text{ДЕФЕКТОВ}} + S_{\text{СКРЫТ.}}}{\sum N_{\text{ОСТАТКА}}}, \quad (9)$$

где k – полное количество клеток в ряду – столбце.

Теперь при построении в поперечных срезах объемного представления линий, очерчивающих основные пределы (предел текучести и т.д.), получаем наглядное представление превышения заданных пределов в конкретных точках. Значения пределов по напряжениям берутся из профильной литературы для соответствующих материалов в каждой клетке. Тогда уточненный график отражения глубины поглощения энергии и ее распределения будет выглядеть представленным на рис. 5 образом.

На рис. 5 слева показано цветное отображение гашения энергии в области, очерчиваемой сеткой, справа – численное представление, по факту аналогичное графику напряжений-деформаций [5], но в трехмерном пространстве. Красным цветом выделена рассматриваемая ячейка, оранжевым – область удара (элементарная площадка), желтым – области с возможным искажением в кристаллической решетке. Необходимо отметить, что в дальнейших расчетах интенсивности будет использоваться рядная система, а не клеточная, так как ранее было введено понятие приведенного объема, учитывающего характер деформации [4].

Заклучение

Таким образом, все необходимые данные, определяющие характер протекшей деформации, а точнее поглощенного напряжения в процессе ДТП, при необходимости можно получить из данного графического представления. При завершении данного алгоритма предоставляется возможность дополнительно определить значения превышений пределов пропорциональностей в исследуемых клетках (10):

$$\sigma_{\text{ТС}} = \sum_1^m \sum_1^k [\sigma_{\text{ПРОП.}} - \sigma_l]. \quad (10)$$

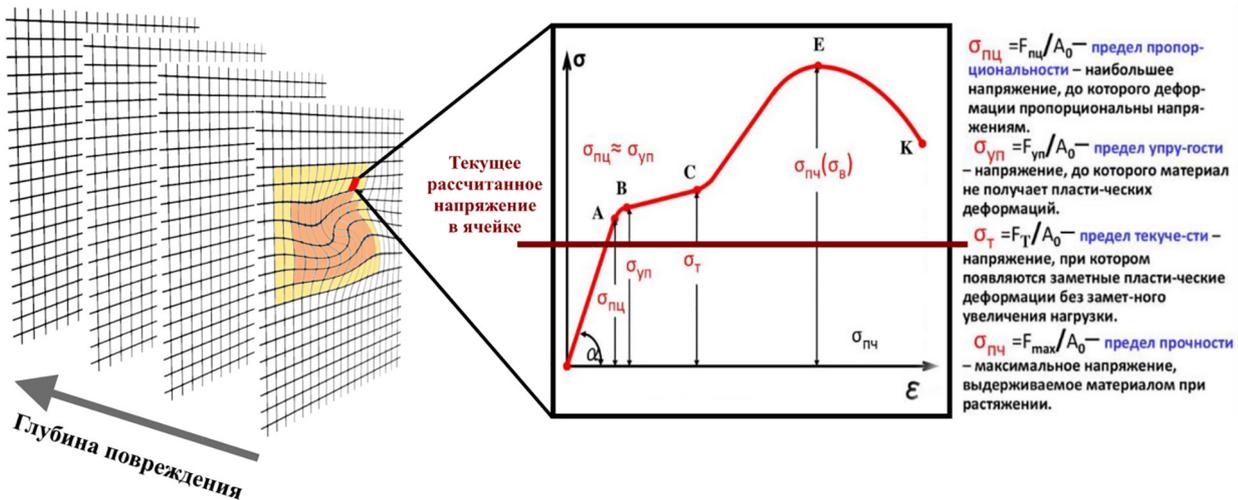


Рис. 5. Уточненное графическое отражение глубины поглощения энергии и ее распределения

Fig. 5. Refined graphical reflection of the depth of energy absorption and its distribution

Значение полученного напряжения логически тождественно энергии, вызвавшей изменение технического состояния транспортного средства в процессе ДТП. При заполнении исследуемой сетки точками в местах превышения заданного напряжения получаем характер данного изменения.

Литература

1. Тупицын И.И., Зубрицкий С.Г. Поиск оценочных показателей послеремонтной надежности ТС после ДТП // Проблемы механики современных машин. Улан-Удэ: Восточно-Сибирский государственный университет технологий и управления (Улан-Удэ), 2018. С. 321–324.
2. Иванов Н.И. Сопrotивление материалов. 6-е изд. М.-СПб.: Государственное Технико-теоретическое издательство, 1933. 492 с.
3. Левин Б.Р. Справочник по надежности. Справочник по надежности / Под ред. Левина Б.Р., в 3 томах, Т. 1. М.: Мир, 1969, 339 с.
4. Тупицын И.И., Зубрицкий С.Г., Кравцева В.А., Красавин П.А. Остаточный ресурс и характер износа транспортных средств в эксплуатации // Журнал АДИ – МАДИ, 2020. № 2 (24).

5. Трошенко В.Т. Рассеянное усталостное повреждение металлов и сплавов. Сообщение 1. Неупругость, методы и результаты исследования // Проблемы прочности. 2005. № 4. С. 12.

References

1. Tupitsyn I.I., Zubris'kiy S.G. Search for estimated indicators of post-repair reliability of the vehicle after an accident. Problemy mekhaniki sovremennykh mashin. Ulan-Ude: Vostochno-Sibirskiy gosudarstvennyy universitet tekhnologii i upravleniya (Ulan-Ude), 2018, pp. 321–324 (in Russ.).
2. Ivanov N.I. Soprotyvleniye materialov [Strength of materials]. 6-e izd. Moscow-SPb.: Gosudarstvennoye Tekhniko-teoreticheskoye izdatel'stvo Publ., 1933. 492 p.
3. Levin B.R. Spravochnik po nadezhnosti [Reliability handbook]. Pod red. Levina B.R., v 3 tomakh, V. 1. Moscow: Mir Publ., 1969, 339 p.
4. Tupitsyn I.I., Zubris'kiy S.G., Kravtseva V.A., Krasavin P.A. Residual resource and the nature of vehicle wear in operation. Zhurnal ADI – MADi, 2020. No 2 (24) (in Russ.).
5. Troshchenko V.T. Dispersed fatigue damage to metals and alloys. Report 1. Inelasticity, research methods and results. Problemy prochnosti. 2005. No 4, pp. 12 (in Russ.).

ASSESSMENT OF VEHICLE DAMAGE FROM THE POINT OF A COMPLEX TECHNICAL SYSTEM WITH ITS OWN STRUCTURE

I.I. Tupitsyn¹, PhD in Engineering S.G. Zubris'kiy¹, PhD in Engineering P.A. Krasavin²

¹Central research and development automobile and engine institute NAMI, Moscow, Russia

²Moscow Automobile and Road Construction State Technical University (MADI), Moscow, Russia

igor.tupitsyn@nami.ru

There is considered a part of the study of post-repair reliability of vehicles from the point of a complex technical system in the form of an algorithm for evaluating diagnostic parameters (probable connections). The problem of the reliability of vehicles in operation is legally put under the control of the President of the Russian Federation and is included in the strategy for ensuring road safety until 2023, which is part of the National Project "Safe Roads".

The initial data of the study at the stage of evaluating probable connections are the parameters of the vehicle movement in the pre-accident time interval and the voltage acting at the contact point of the object, which is obtained based on these parameters. The main method of assessment is the calculation of cells of different types using the grid method, depending on the nature of the damage to the vehicle. In order to decompose the contact point into cells of different types, it is recommended to use appropriate certified measuring instruments and certified equipment: flaw detectors and so on. For the convenience of using the algorithm and reducing the error of using the given mathematical model in a comprehensive assessment of the reliability of vehicles, the article provides a definition of the reduced volume and correction coefficients.

The output data of the algorithm for evaluating diagnostic parameters are the updated values of stresses at the contact point of the object under study, as well as a detailed picture of the distribution of strain energy in the object. As a result, the obtained values can be used for further evaluation of changes in the regulated values of the vehicle properties established by the manufacturer and controlled within the framework of the failure prevention system or technical inspection.

Keywords: residual resource, vehicle, damage assessment, road traffic accident (RTA).

Cite as: Tupitsyn I.I., Zubris'kiy S.G., Krasavin P.A. Assessment of vehicle damage from the point of a complex technical system with its own structure. *Izvestiya MGTU «MAMI»*. 2021. No 3 (49), pp. 42–48 (in Russ.). DOI: 10.31992/2074-0530-2021-49-3-42-48