

Авиационная и ракетно-космическая техника

УДК 629.784

doi: 10.18698/0536-1044-2023-10-96-105

Анализ прочности печатной платы на растяжение–сжатие методом частиц

С.В. Аринчев

МГТУ им. Н.Э. Баумана

Printed circuit board stress strain strength analysis using the particle approach

S.V. Arinchev

Bauman Moscow State Technical University

Традиционно печатную плату используют как электротехнический прибор. Вместе с тем в перспективных наноспутниках ее применяют в качестве несущего элемента конструкции. На печатной плате можно разместить сравнительно тяжелую солнечную батарею, вращающиеся гироскопы и складную антенну. Расчет несущей печатной платы на прочность осложнен большим количеством концентраторов напряжений, конструктивных дефектов ее поверхности. Это затрудняет использование традиционного понятия «напряжение в точке», применяемого в непрерывных и дифференцируемых средах. Вместо него предложено понятие «момент времени начала отрывного разрушения модели для заданной пары частиц». Расчеты показывают, что даже медленное нагружение модели печатной платы приводит к крайне интенсивному движению частиц, т. е. гипотеза статического нагружения не работает. Для анализа прочности печатной платы сформулирована задача Коши с начальными условиями. Выполнен анализ сходимости решения задачи по числу частиц модели. Показано, что скорость сходимости достаточно высока, и для решения рассматриваемой задачи достаточно использовать модель, содержащую около 100 частиц.

Ключевые слова: несущая печатная плата, метод частиц, момент времени начала разрушения

Traditionally, the load-carrying printed circuit boards are applied as an electrical engineering device. At the same time, the promising nanosatellites are using them as the spacecraft load-bearing structural elements. The printed circuit board is able to accommodate a relatively heavy solar cell, rotating gyroscopes and a folding antenna. Load-carrying board strength calculation is a complicated task, as a large number of stress concentrators and structural defects are effecting its surface. This makes it difficult to use the traditional concept of “stress at a point” applicable in continuous and differentiable media. In this regard, the paper proposes to introduce the concept of the “model rupture-start time moment for a given particle pair”. Calculations show that even slow loading of the model under consideration leads to extremely intense particles motion, i.e. the static loading hypothesis does not work. To analyze strength of the board under consideration, the Cauchy problem with ini-

tial conditions was formulated. The problem solution convergence based on the number of particles in the model was analyzed. The paper shows that the convergence rate is quite high, and to solve the problem under consideration it is sufficient to take a model containing about 100 particles.

Keywords: load-carrying printed circuit board, particle method, rupture-start time moment

Постановка задачи. Традиционно печатную плату (ПП) рассматривают как электротехнический прибор. Вместе с тем в перспективных наноспутниках ее применяют в качестве несущего элемента конструкции. На ПП как на несущей платформе можно разместить сравнительно тяжелую солнечную батарею, вращающиеся гироскопы и даже складную антенну (рис. 1).

Как несущий элемент конструкции, ПП подлежит расчету на прочность. Однако существующие методики, как правило, не рассматривают ПП в таком качестве.

Так, ГОСТ Р 55744–2013 [1] регламентирует испытания прочности: медного покрытия ПП при растяжении, на отслаивание проводников и вырыв покрытий из сквозного металлизированного отверстия, адгезии паяльной маски и т. п. Все указанные механические испытания выполняют под электрической нагрузкой.

В работе [2] предложена методика испытания на вырыв контактных выводов ПП. Оценена возможность образования трещин. Приведены результаты сравнения данных, полученных при испытаниях и расчете методом конечных элементов.

Разработан метод оценки выносливости компонентов матрицы шариковых выводов (типа BGA) и матрицы растровых выводов (типа PGA) под действием тепловых нагрузок [3].

В работе [4] рассмотрена проблема размягчения (стеклования) несущего материала ПП

под действием высоких температур в диапазоне 130...230 °С. Выполнено сравнение ПП типа FR4 и полиимидных ПП с припоями типа Sn3Ag0.5Cu. Исследовано их поведение под действием циклических температурных нагрузок и механического виброн нагружения.

Выполнена оценка выносливости ПП типа FR4 с проводящим никель-фосфорным слоем заданного сопротивления под действием разрушающих импульсных нагрузок [5].

В работе [6] предложен метод неразрушающего контроля паяных соединений ПП, включающий в себя контроль соединения со стороны поверхности ПП и ее сквозного отверстия. Внешние воздействия — циклический изгиб и акустическая эмиссия.

Исследованы динамическая прочность и жесткость ПП как призматического стержня на осциллирующих опорах [7].

В статье [8] идентифицированы механические характеристики гибких (тонких) ПП со специальными покрытиями. При испытаниях ПП изгибали на 135° с частотой, равной 175 изгибаниям в минуту.

В работе [9] рассмотрено напряженно-деформированное состояние конечно-элементной модели шестислойной ПП. Оценены возможности компьютерного моделирования напряженно-деформированного состояния сложных ПП. Приведены результаты ударных испытаний.

Предложен новый тип ПП — тканевые ПП, которые обладают уникальными механическими и электрическими свойствами, приобретают произвольную форму и могут быть использованы в качестве материала для одежды оператора [10].

В обзоре [11] даны ссылки на сто одну работу, где приведены результаты анализа возможности использования жидких металлов для изготовления гибких ПП. Жидкие металлы обладают высокой текучестью и проводимостью при комнатной температуре. Недостатками жидких металлов являются их высокое поверхностное натяжение и быстрое окисление.

Создано высокоэффективное фторсодержащее керамическое водоотталкивающее покрытие

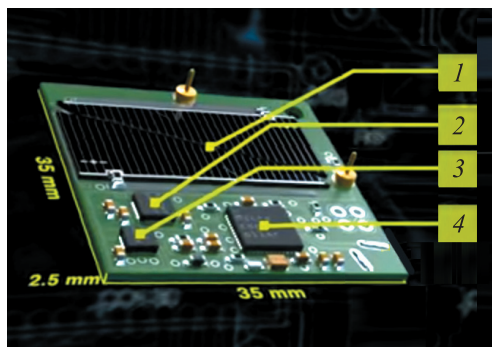


Рис. 1. Внешний вид ПП — несущего элемента наноспутника:

- 1 — солнечная батарея; 2 — магнитометр; 3 — гироскоп;
4 — микроконтроллер со сверхвысокочастотным транзистором

тие ПП, показавшее высокую стойкость к интенсивным атмосферным воздействиям [12].

Разработан неразрушающий метод выявления критических дефектов ПП и оценки срока ее годности с учетом действия эксплуатационных нагрузок [13]. В методе задействованы возможности акустического излучения и рентгеновской томографии.

В работе [14] предложен оптимальный способ крепления многослойной ПП к опоре из условия минимума механических напряжений. Выявлено влияние сосредоточенных масс, локализованных в разных местах такого устройства.

Разработан способ комплексного анализа механических характеристик ПП в составе радиоэлектронных модулей, учитывающий механическую прочность проводников и переходных отверстий с применением специальной экспертной системы [15].

Предложена методика механических испытаний на определение предела прочности при растяжении медного покрытия ПП [16].

Создан алгоритм комплексного анализа механических характеристик ПП в составе радиоэлектронных модулей, учитывающий механическую прочность проводников и переходных

отверстий [17]. Разработана методика оценки прочности на вырыв покрытия из сквозного металлизированного отверстия ПП [18].

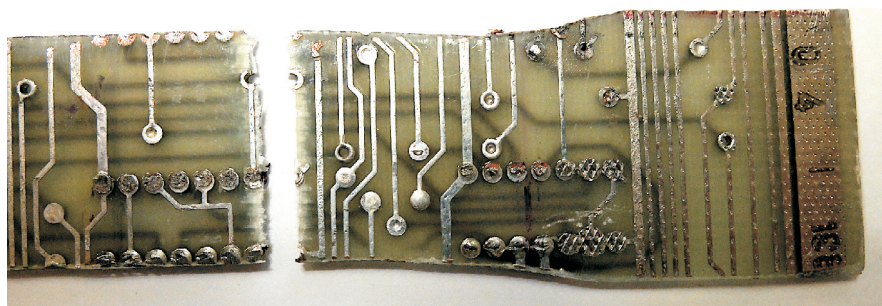
В статье [19] описана подсистема АСОНИКА-УСТ, предназначенная для анализа усталостной прочности конструкций ПП и электрорадиоизделий при механических воздействиях.

Таким образом, проблема анализа прочности ПП с большим числом концентраторов напряжений как несущего элемента конструкции изучена недостаточно.

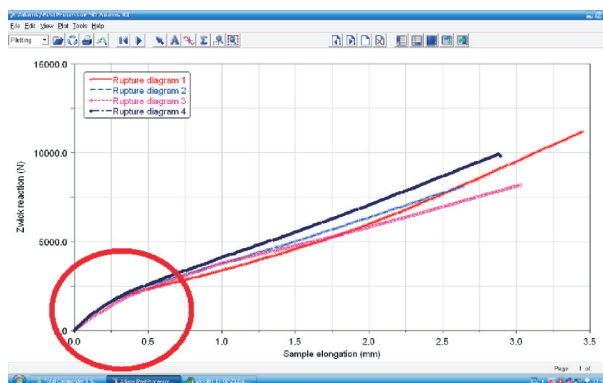
Цель статьи — разработка методики анализа прочности ПП с большим числом концентраторов напряжений как несущего элемента конструкции летательного аппарата.

Испытания несущей способности ПП. Результаты эксперимента по оценке несущей способности ПП типа FR4 с концентраторами напряжений приведены на рис. 2, а и б. Эксперимент проведен на разрывной машине Zwick. Как видно из рис. 2, а, разрыв образца ПП произошел строго по концентратору напряжений.

Диаграммы разрыва четырех образцов приведены на рис. 2, б. Участок диаграммы внутри



а



б

Рис. 2. Результаты экспериментального исследования по определению несущей способности ПП типа FR4 с концентраторами напряжений:

а — разрыв образца ПП по концентратору напряжений; б — диаграммы разрыва четырех образцов ПП

окружности — характеристика разрывной машины. Видно, что все диаграммы вплоть до момента разрыва — линейные. Усилие в момент разрыва равно примерно 10 000 Н, т. е. ПП с концентраторами напряжений выдерживает значительную нагрузку и может быть использована как несущий элемент конструкции летательного аппарата.

Силовая функция частицы. Для определения прочности ПП использован метод частиц. Частицы — материальные точки, соединенные связями. Частицы движутся поступательно по координатной плоскости, вращений нет. Зависимость реакции связи между частицами от расстояния между ними — силовая функция частицы.

Вариант рассматриваемой модели ПП с числом частиц $l = 55$, приведенный на рис. 3, содержит 49 рабочих частиц (№ 1–49), два микро-чипа № 50 и 51 (выделенных фиолетовыми прямоугольниками), и четыре крепежные частицы (⊙).

Силовую функцию частицы можно задавать по-разному. Здесь принято (см. рис. 3, внутри красной окружности), что частица взаимодействует только со своими ближайшими восемью соседями. В начальный момент времени все частицы находятся в состоянии упругого равновесия: по стороне и диагонали ячейки сетки частиц. Ячейки бывают квадратными и прямоугольными.

Силовая функция для квадратной ячейки сетки частиц показана на рис. 4. Она имеет два состояния упругого равновесия внутри зон упругих деформаций II и IV. Область действия силовой функции ограничена зонами отрывного разрушения при сжатии I и растяжении V.

Под действием внешнего нагружения частица может переходить из одного состояния упругого равновесия в другое и возвращаться обратно. Частица может выходить в зону от-

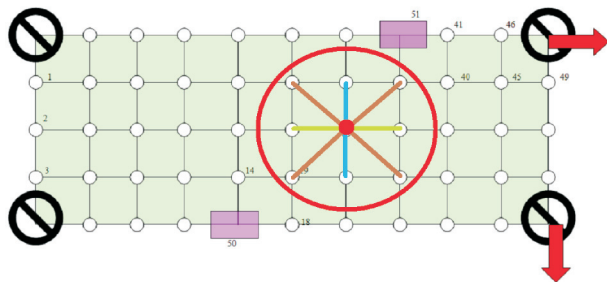


Рис. 3. Модель ПП с числом частиц $l = 55$

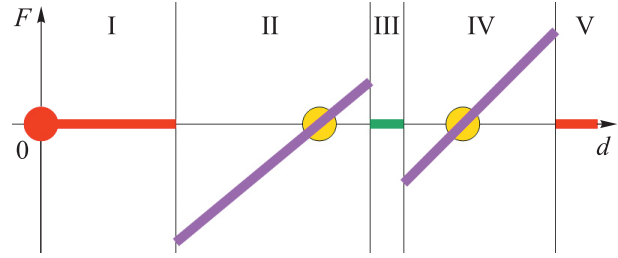


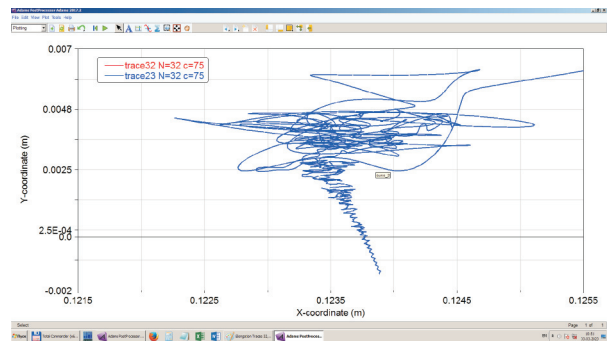
Рис. 4. Силовая функция для квадратной ячейки сетки частиц:

I и V — зоны отрывного разрушения при сжатии и растяжении; II и IV — первая и вторая зоны упругих деформаций; III — зона безразличного равновесия

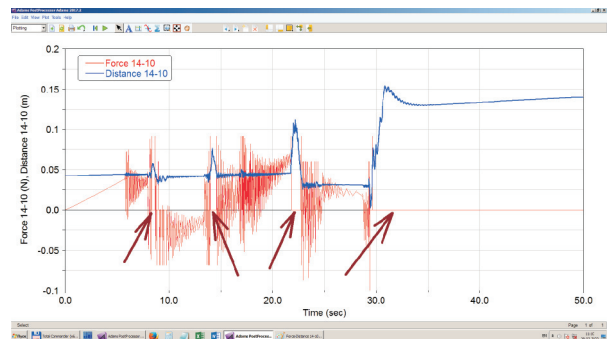
рывного разрушения при сжатии или растяжении и возвращаться обратно.

Если частица «срывается с кромки» силовой функции и переходит в зону безразличного равновесия III (в зону отрывного разрушения при сжатии или растяжении), то возникает интенсивный переходный процесс — так называемый узелок (рис. 5, а).

При этом красная кривая, отражающая зависимость силовой функции от времени, обнуляется в интервалах, показанных стрелками на рис. 5, б. У пары частиц 14–10 четыре интервала



а



б

Рис. 5. Примеры образования характерного узелка траектории частицы на фазовой плоскости (а) и возникновения интервалов обнуления значений силовой функции для пары частиц 14–10 (б)

обнуления, т. е. эта пара разорвалась только с четвертого раза.

Особый интерес представляет момент времени первого обнуления силовой функции в интервале — момент времени начала отрывного разрушения модели для заданной пары частиц. В рассматриваемой задаче прочности понятие «момент времени начала отрывного разрушения модели для заданной пары частиц» выступает альтернативой традиционному понятию «напряжение в точке».

Для прямоугольной ячейки сетки частиц силовая функция строится аналогично. Только будет не два состояния упругого равновесия, а три — по меньшей и большей сторонам прямоугольника и по его диагонали.

Задача Коши для ПП. Частицы — материальные точки, движущиеся поступательно по координатной плоскости. Уравнения динамики i -й частицы для сил в проекции имеют следующий вид:

- на ось координат OX

$$-m_i \ddot{x}_i - \gamma_i \dot{x}_i + \sum_{j=1}^l F_{ij}(d_{ij}, c_{ij}) \cos \theta_{ij} \text{Index}_{ij} = 0; \quad (1)$$

- на ось координат OY

$$-m_i \ddot{y}_i - \gamma_i \dot{y}_i + \sum_{j=1}^l F_{ij}(d_{ij}, c_{ij}) \sin \theta_{ij} \text{Index}_{ij} = 0; \quad (2)$$

$$i = 1, \dots, k, \quad k = l - 4,$$

где m_i — масса i -й частицы; x_i, y_i — координаты i -й частицы; γ_i — коэффициент вязкого трения i -й частицы; $F_{ij}(d_{ij}, c_{ij})$ — реакция связи i -й и j -й частиц, определяемая силовой функцией (см. рис. 4); d_{ij} и c_{ij} — расстояние и жесткость связи между i -й и j -й частицами соответственно; θ_{ij} — угол между отрезком, соединяющим i -ю и j -ю частицы, и координатной осью OX ; Index_{ij} — особая матрица, определяющая пары взаимодействующих частиц, если i -я частица взаимодействует с j -й частицей, то $\text{Index}_{ij} = 1$, если взаимодействия нет, то $\text{Index}_{ij} = 0$.

В выражениях (1) и (2):

$$d_{ij} = \sqrt{(x_j - x_i)^2 + (y_j - y_i)^2};$$

$$\cos \theta_{ij} = (x_j - x_i) / d_{ij};$$

$$\sin \theta_{ij} = (y_j - y_i) / d_{ij}.$$

Выражения (1) и (2), учитывающие силы инерции, силы вязкого трения и реакции связи между частицами, составляют для рабочих

частиц и микрочипов. Их интегрируют методом Рунге — Кутты четвертого порядка с автоматическим выбором шага. Крепежные частицы движутся по заданному закону, определяемому характером кинематического нагружения.

Начальные координаты частиц соответствуют рис. 3:

$$x_i(0) = x_{i0}; \quad y_i(0) = y_{i0}. \quad (3)$$

В начальный момент времени рабочие частицы и микрочипы неподвижны.

Во всех расчетных случаях нагружение имеет кинематический характер и определяется законом движения четырех крепежных частиц (см. рис. 3). Две левые крепежные частицы всегда неподвижны, а две правые — движутся с малой скоростью, равной 0,001 м/с, в течение 50 с по стрелкам.

Для прямоугольной ПП размером 0,06×0,15 м имеем

$$x_{l-3} = 0; \quad x_{l-2} = 0;$$

$$x_{l-1} = 0,15 \text{ м}; \quad x_l = 0,15 \pm 0,001t, \text{ м};$$

$$y_{l-3} = 0; \quad y_{l-2} = 0,06 \text{ м};$$

$$y_{l-1} = \mp 0,001t, \text{ м}; \quad y_l = 0,06 \text{ м}, \quad (4)$$

где знак «+» соответствует растяжению ПП, знак «-» — сжатию ПП; t — время.

Анализ сходимости решения задачи по числу частиц модели ПП при растяжении. Для одной и той же задачи в постановке (1)–(4) рассмотрены четыре модели ПП с числом частиц $l = 8, 18, 36$ и 55 .

Траектории движения частиц по координатной плоскости для модели с числом частиц $l = 55$ показаны на рис. 6, а. Видно, что ПП разрывается в окрестности контрольной пары частиц 51–40, расположенных по диагонали квадратной ячейки. Траектории имеют много узелков.

Каждый узелок — это переходный процесс, возникающий при «срыве» частицы с кромки силовой функции в зону безразличного равновесия (см. рис. 4). Медленное кинематическое нагружение (медленное движение двух крепежных частиц по стрелкам, показанным на рис. 6, а) вызывает интенсивное движение частиц, т. е. гипотеза статического нагружения не работает.

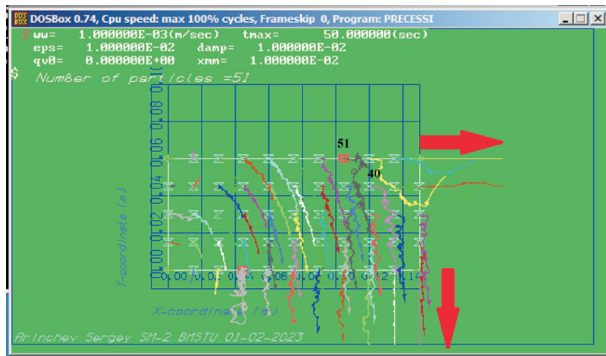
Красная кривая, отражающая зависимость силовой функции от времени, обнуляется в интервале, показанном на рис. 6, б. Момент вре-

мени начала обнуления — 8,02 с. Это есть момент времени начала отрывного разрушения модели для пары частиц 51–40.

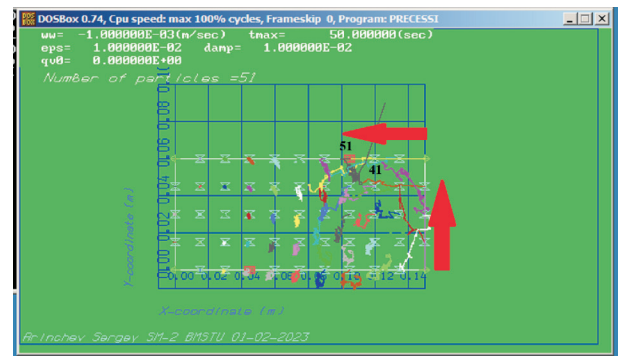
Зависимость момента времени начала отрывного разрушения от числа частиц для четырех рассматриваемых моделей приведена на рис. 6, в. Наличие характерной полочки на графике свидетельствует о сходимости решения задачи по числу частиц модели при растяже-

нии. Таким образом, для решения рассматриваемой задачи прочности в постановке (1)–(4) достаточно взять около 100 частиц.

Анализ сходимости решения задачи по числу частиц модели при сжатии. Аналогичный анализ сходимости решения по числу частиц модели проведен при оценке прочности этой же ПП, работающей на сжатие.



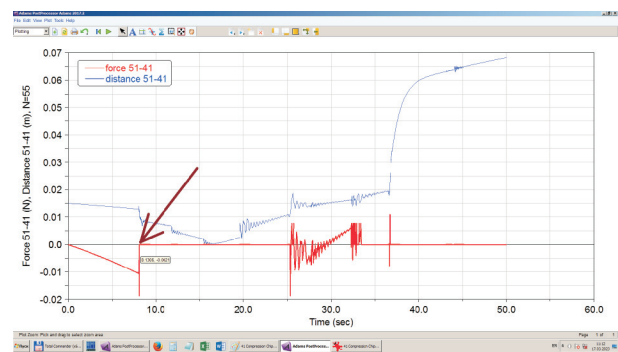
а



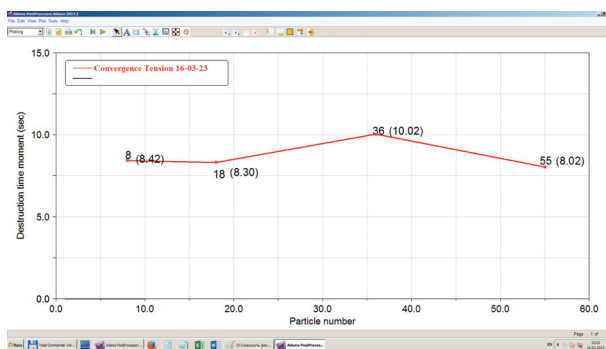
а



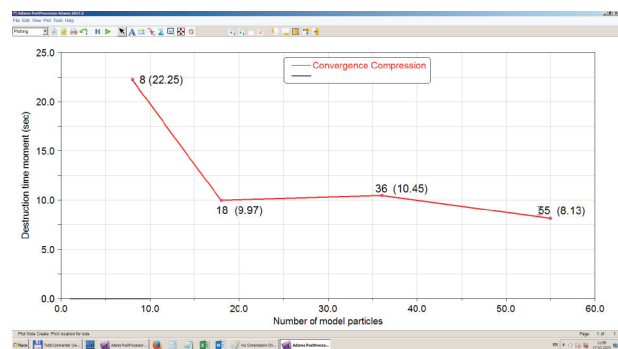
б



б



в



в

Рис. 6. Результаты исследования сходимости решения задачи по числу частиц модели ПП при ее растяжении:

а — траектории движения частиц модели ($l = 55$) по координатной плоскости; б — пример возникновения момента времени начала отрывного разрушения модели ($l = 55$) для пары частиц 51–40; в — зависимость момента времени начала отрывного разрушения от числа частиц модели

Рис. 7. Результаты исследования сходимости решения задачи по числу частиц для модели ПП при ее сжатии:

а — траектории движения частиц модели ($l = 55$) по координатной плоскости; б — пример возникновения момента времени начала отрывного разрушения модели ($l = 55$) для пары частиц 51–41; в — зависимость момента времени начала отрывного разрушения от числа частиц модели

Траектории движения частиц модели ($l = 55$) по координатной плоскости показаны на рис. 7, а. Две крепежные частицы медленно движутся по стрелкам со скоростью 0,001 м/с, ПП скручивается и разрывается. Контрольная пара частиц 51–41 выбрана в зоне отрывного разрушения. Она расположена по стороне квадратной ячейки сетки частиц. Частица 51 (микрочип № 2) отрывается и улетает.

Траектории имеют много узелков, каждый из которых соответствует переходному процессу, возникающему при «срыве» частицы с кромки силовой функции в зону безразличного равновесия (см. рис. 4). Медленное нагружение вызывает интенсивное движение частиц, т. е. гипотеза статического нагружения не работает.

Красная кривая, отражающая зависимость силовой функции от времени, показанная на рис. 7, б, обнуляется в нескольких интервалах. Это означает, что пара частиц разорвалась только с третьего раза. Момент времени начала первого обнуления 8,13 с — момент времени начала отрывного разрушения модели при сжатии для пары частиц 51–41.

Зависимость момента времени начала отрывного разрушения от числа частиц рассматриваемых моделей для ПП, работающей на сжатие, приведена на рис. 7, в. Наличие на графике характерной полочки свидетельствует о сходимости решения задачи по числу частиц. Таким образом, для решения рассматриваемой задачи прочности в постановке (1)–(4) достаточно взять около 100 частиц.

Выводы

1. Несущая ПП имеет много концентраторов напряжений и конструктивных дефектов поверхности. Поэтому понятие «напряжение в точке» при анализе прочности ПП следует заменить понятием «момент времени начала отрывного разрушения модели для заданной пары частиц».

2. Метод частиц имеет высокую скорость сходимости. Для решения рассматриваемой двумерной задачи прочности ПП на растяжение–сжатие достаточно взять около 100 частиц.

Литература

- [1] ГОСТ Р 55744–2013. *Платы печатные. Методы испытаний физических параметров*. Москва, Стандартинформ, 2014. 23 с.
- [2] Cai M., Xie D.J., Zhang Z. et al. Investigation on PCB pad strength. *11th Int. Conf. on Electronic Packaging Technology & High Density Packaging*, 2010, pp. 1226–1229, doi: <https://doi.org/10.1109/ICEPT.2010.5582773>
- [3] Azin A., Zhukov A.A., Ponomarev S.A. et al. Durability evaluation method for contact component interconnections in printed circuit boards under thermal loads. *AIP Conf. Proc.*, 2017, vol. 1899, no. 1, art. 60015, doi: <https://doi.org/10.1063/1/5009886>
- [4] Qi H., Ganesan S., Wu J. et al. Effects of printed circuit board materials on lead-free interconnect durability. *Polytronic*, 2005, pp. 140–144, doi: <https://doi.org/10.1109/POLYTR.2005.1596504>
- [5] Klossowicz A., Winiarski P., Dziedzic A. Pulse durability of thin-film resistors embedded in printed circuit boards. *Photonics and Microsystems*, 2011, pp. 68–72, doi: <https://doi.org/10.1109/STYSW.2011.6155846>
- [6] Kovtun I., Boiko J., Petrashchuk S. Nondestructive strength diagnostics of solder joints on printed circuit boards. *UkrMiCo*, 2017, doi: <https://doi.org/10.1109/UkrMiCo.2017.8095401>
- [7] Kovtun I.I., Boiko J.M., Petrashchuk S.A. Mathematical model for dynamic force analysis of printed circuit boards. *J. Phys.: Conf. Ser.*, 2021, vol. 1921, 012120, doi: <https://doi.org/10.1088/1742-6596/1921/1/012120>
- [8] Kim J., Kim B.Y., Park S.D. et al. Mechanical durability of flexible printed circuit boards containing thin coverlays fabricated with poly (amide-imide-urethane)/epoxy interpenetrating networks. *Micromachines*, 2021, vol. 12, no. 8, art. 943, doi: <https://doi.org/10.3390/mi12080943>
- [9] Wang Y., Low K.H., Pang H.L.J. et al. Modeling and simulation for a drop-impact analysis of multi-layered printed circuit boards. *Microelectron. Reliab.*, 2006, vol. 46, no. 2-4, pp. 558–573, doi: <https://doi.org/10.1016/j.microrel.2005.05.007>

- [10] Li Q., Tao X.M. Three-dimensionally deformable, highly stretchable, permeable, durable and washable fabric circuit boards. *Proc. R. Soc. A*, 2014, vol. 470, no. 2171, art. 20140472, doi: <http://dx.doi.org/10.1098/rspa.2014.0472>
- [11] Xu D., Cao J., Liu F. et al. Liquid metal based nano-composites for printable stretchable electronics. *Sensors*, 2022, vol. 22, no. 7, art. 2516, doi: <https://doi.org/10.3390/s22072516>
- [12] Wan S., Cong Y., Jiang D. et al. Weathering barrier enhancement of printed circuit board by fluorinated silica based superhydrophobic coating. *Colloids Surf. A*, 2018, vol. 538, pp. 628–638, doi: <https://doi.org/10.1016/j.colsurfa.2017.11.056>
- [13] Азин А.В., Марицкий Н.Н., Пономарев С.В. и др. Прогнозирование долговечности паяных контактных соединений микросхем. *Вестник Томского государственного университета. Математика и механика*, 2022, № 76, с. 43–55, doi: <https://doi.org/10.17223/19988621/76/4>
- [14] Аль-Араджи З.Х.М., Макаров О.Ю., Турецкий А.В. и др. Оптимизация способа закрепления печатной платы для минимизации механических напряжений. *Радиотехника*, 2021, т. 85, № 6, с. 5–11, doi: <https://doi.org/10.18127/j00338486-202106-01>
- [15] Белецкая С.Ю., Иевлев П.В., Турецкий А.В. Применение экспертных систем при проектировании печатных плат с учетом требований по механической прочности. *Вестник Воронежского государственного университета*, 2013, т. 9, № 6–3, с. 33–35.
- [16] Быков А.П. Механические испытания на определение предела прочности при растяжении и удлинении медного покрытия печатных плат. *Актуальные проблемы радиоэлектроники и телекоммуникаций. Сб. тр. Всерос. науч.-тех. конф.* Королев, Вектор, 2020, с. 125–126.
- [17] Макаров О.Ю., Титов В.Л., Турецкий А.В. Алгоритм анализа печатных плат на механическую прочность. *Радиотехника*, 2013, № 12, с. 62–65.
- [18] Мокшин Н.Ю. Определение прочности на вырыв покрытий из сквозного металлизированного отверстия печатной платы. *Актуальные проблемы радиоэлектроники и телекоммуникаций. Сб. тр. Всерос. науч.-тех. конф.* Королев, Вектор, 2020, с. 164–165.
- [19] Шалумов А.С., Першин Е.О., Шалумов М.А. АСОНИКА-УСТ: Анализ усталостной прочности конструкций печатных плат и электрорадиоизделий при механических воздействиях. *Автоматизация. Современные технологии*, 2019, т. 73, № 5, с. 195–198.

References

- [1] GOST R 55744–2013. *Platy pechatnye. Metody ispytaniy fizicheskikh parametrov* [State standard GOST R 55744–2013. Printed circuit boards. Physical parameters test methods]. Moscow, Standartinform Publ., 2014. 23 p. (In Russ.).
- [2] Cai M., Xie D.J., Zhang Z. et al. Investigation on PCB pad strength. *11th Int. Conf. on Electronic Packaging Technology & High Density Packaging*, 2010, pp. 1226–1229, doi: <https://doi.org/10.1109/ICEPT.2010.5582773>
- [3] Azin A., Zhukov A.A., Ponomarev S.A. et al. Durability evaluation method for contact component interconnections in printed circuit boards under thermal loads. *AIP Conf. Proc.*, 2017, vol. 1899, no. 1, art. 60015, doi: <https://doi.org/10.1063/1/5009886>
- [4] Qi H., Ganesan S., Wu J. et al. Effects of printed circuit board materials on lead-free interconnect durability. *Polytronic*, 2005, pp. 140–144, doi: <https://doi.org/10.1109/POLYTR.2005.1596504>
- [5] Klossowicz A., Winiarski P., Dziedzic A. Pulse durability of thin-film resistors embedded in printed circuit boards. *Photonics and Microsystems*, 2011, pp. 68–72, doi: <https://doi.org/10.1109/STYSW.2011.6155846>
- [6] Kovtun I., Boiko J., Petrashchuk S. Nondestructive strength diagnostics of solder joints on printed circuit boards. *UkrMiCo*, 2017, doi: <https://doi.org/10.1109/UkrMiCo.2017.8095401>
- [7] Kovtun I.I., Boiko J.M., Petrashchuk S.A. Mathematical model for dynamic force analysis of printed circuit boards. *J. Phys.: Conf. Ser.*, 2021, vol. 1921, 012120, doi: <https://doi.org/10.1088/1742-6596/1921/1/012120>

- [8] Kim J., Kim B.Y., Park S.D. et al. Mechanical durability of flexible printed circuit boards containing thin coverlays fabricated with poly (amide-imide-urethane)/epoxy interpenetrating networks. *Micromachines*, 2021, vol. 12, no. 8, art. 943, doi: <https://doi.org/10.3390/mi12080943>
- [9] Wang Y., Low K.H., Pang H.L.J. et al. Modeling and simulation for a drop-impact analysis of multi-layered printed circuit boards. *Microelectron. Reliab.*, 2006, vol. 46, no. 2-4, pp. 558–573, doi: <https://doi.org/10.1016/j.microrel.2005.05.007>
- [10] Li Q., Tao X.M. Three-dimensionally deformable, highly stretchable, permeable, durable and washable fabric circuit boards. *Proc. R. Soc. A*, 2014, vol. 470, no. 2171, art. 20140472, doi: <http://dx.doi.org/10.1098/rspa.2014.0472>
- [11] Xu D., Cao J., Liu F. et al. Liquid metal based nano-composites for printable stretchable electronics. *Sensors*, 2022, vol. 22, no. 7, art. 2516, doi: <https://doi.org/10.3390/s22072516>
- [12] Wan S., Cong Y., Jiang D. et al. Weathering barrier enhancement of printed circuit board by fluorinated silica based superhydrophobic coating. *Colloids Surf. A*, 2018, vol. 538, pp. 628–638, doi: <https://doi.org/10.1016/j.colsurfa.2017.11.056>
- [13] Azin A.V., Maritskiy N.N., Ponomarev S.V. et al. Prediction of durability of soldered contact joints of chips. *Vestnik Tomskogo gosudarstvennogo universiteta. Matematika i mekhanika* [Tomsk State University Journal of Mathematics and Mechanics], 2022, no. 76, pp. 43–55, doi: <https://doi.org/10.17223/19988621/76/4> (in Russ.).
- [14] Al-Aradzhi Z.Kh.M., Makarov O.Yu., Turetskiy A.V. et al. Methodology for choosing the optimal layout of multilayer printed circuit boards taking into account external mechanical influences. *Radiotekhnika* [Radioengineering], 2021, vol. 85, no. 6, pp. 5–11, doi: <https://doi.org/10.18127/j00338486-202106-01> (in Russ.).
- [15] Beletskaya S.Yu., Ievlev P.V., Turetskiy A.V. Use of expert systems at design of pcb taking into account requirements for mechanical durability. *Vestnik Voronezhskogo Gosudarstvennogo Universiteta* [Bulletin of Voronezh State Technical University], 2013, vol. 9, no. 6–3, pp. 33–35. (In Russ.).
- [16] Bykov A.P. [Mechanical tests to determine the tensile strength and elongation of copper plating on printed circuit boards]. *Aktualnye problemy radioelektroniki i telekommunikatsiy. Sb. tr. Vseros. nauch.-tekh. konf.* [Current Issues in Radio Electronics and Telecommunications. Proc. Russ. Sci.-Tech. Conf.]. Korolev, Vektor Publ., 2020, pp. 125–126. (In Russ.).
- [17] Makarov O.Yu., Titov V.L., Turetskiy A.V. Algoritm analiza pechatnykh plat na mekhanicheskuyu prochnost. *Radiotekhnika* [Radioengineering], 2013, no. 12, pp. 62–65. (In Russ.).
- [18] Mokshin N.Yu. [Determination of tear-off strength of coatings from a through metallised hole on a printed circuit board]. *Aktualnye problemy radioelektroniki i telekommunikatsiy. Sb. tr. Vseros. nauch.-tekh. konf.* [Current Issues in Radio Electronics and Telecommunications. Proc. Russ. Sci.-Tech. Conf.]. Korolev, Vektor Publ., 2020, pp. 164–165. (In Russ.).
- [19] Shalumov A.S., Pershin E.O., Shalumov M.A. ASONIKA-UST: fatigue strength analysis of printed circuit boards and electrical equipment at mechanical coercion. *Avtomatizatsiya. Sovremennye tekhnologii* [Automation. Modern Technologies], 2019, vol. 73, no. 5, pp. 195–198. (In Russ.).

Статья поступила в редакцию 07.05.2023

Информация об авторе

АРИНЧЕВ Сергей Васильевич — доктор технических наук, профессор кафедры «Аэрокосмические системы». МГТУ им. Н.Э. Баумана (105005, Москва, Российская Федерация, 2-я Бауманская ул., д. 5, стр. 1, e-mail: arinchev@inbox.ru).

Information about the author

ARINCHEV Sergey Vasilyevich — Doctor of Science (Eng.), Professor, Department of Aerospace Systems. Bauman Moscow State Technical University (105005, Moscow, Russian Federation, 2nd Baumanskaya St., Bldg. 5, Block 1, e-mail: arinchev@inbox.ru).

Просьба ссылаться на эту статью следующим образом:

Аринчев С.В. Анализ прочности печатной платы на растяжение–сжатие методом частиц. *Известия высших учебных заведений. Машиностроение*, 2023, № 10, с. 96–105, doi: 10.18698/0536-1044-2023-10-96-105

Please cite this article in English as:

Arinchev S.V. Printed circuit board stress strain strength analysis using the particle approach. *BMSTU Journal of Mechanical Engineering*, 2023, no. 10, pp. 96–105, doi: 10.18698/0536-1044-2023-10-96-105



Издательство МГТУ им. Н.Э. Баумана
предлагает читателям учебное пособие

«Теория поддресоривания высокоподвижных двухзвенных гусеничных машин»

Авторы: Г.О. Котиев, Е.Б. Сарач, А.А. Стадучин

Рассмотрены вопросы теории поддресоривания транспортных гусеничных машин: критерии плавности хода, прогнозирование быстроходности при ограничении по системе поддресоривания, математическое моделирование движения гусеничной машины по неровностям местности и моделирование дорожно-грунтовых условий, синтез многоуровневых систем поддресоривания и выбор их характеристик, управляемые системы поддресоривания гусеничных и колесных машин, а также вопросы управления углом складывания секций двухзвенной гусеничной машины в целях повышения быстроходности. Представлены перспективы развития систем поддресоривания.

Для студентов высших учебных заведений, обучающихся по специальностям «Транспортные средства специального назначения» и «Наземные транспортно-технологические средства».

По вопросам приобретения обращайтесь:

105005, Москва, 2-я Бауманская ул., д. 5, стр. 1.
Тел.: +7 499 263-60-45, факс: +7 499 261-45-97;
press@bmstu.ru; <https://bmstu.press>