

Анализ моделей адгезии при очистке поверхностей деталей авиационной техники от микрочастиц

*Национальный аэрокосмический университет им. Н.Е. Жуковского «ХАИ»
Национальный университет обороны Украины им. Ивана Черняховского
Государственное предприятие «Антонов»*

В работе представлена методика выбора модели для описания сил адгезии, в наибольшей степени соответствующей условиям очистки деталей авиационной техники от микрочастиц. Показано, что для моделирования взаимодействия микрочастиц, находящихся в адгезионном контакте с поверхностью детали, с ударными волнами, возникающими при детонационной очистке, силу адгезии следует учитывать согласно DMT модели.

Ключевые слова: очистка поверхности, силы адгезии, микрочастицы.

Введение

Очистка деталей авиационной техники является обязательным этапом восстановительного ремонта. От ее эффективности во многом зависит послеремонтный ресурс техники. Основными источниками загрязнений поверхности деталей авиационной и военной техники, подлежащие удалению при восстановительных ремонтах являются: микрочастицы, появляющиеся в результате износа в ходе эксплуатации; рабочие среды; пыль в производственных помещениях; предметы, с которыми соприкасаются детали при ремонтных работах и др.

В ходе эксплуатации в узлах трения авиационной техники образуются микрочастицы от различного рода износа: отслаиванием – изнашивание поверхностей при скольжениях; микрорезанием – изнашивание, обусловленное взаимным проникновением микронеровностей скользящих поверхностей друг в друга или изнашивание под действием абразивных частиц; изнашивания в парах качения; усталостном выкрашивании. Каждому виду износа соответствуют частицы определенной формы и размера [1].

Для обеспечения послеремонтного ресурса авиационной техники все эти микрочастицы должны быть удалены, особенно с поверхностей деталей, контактирующих с рабочими жидкостями (топливной, гидравлической, смазочной систем). Традиционные технологии очистки используют для этого промывку в течение длительного времени (иногда несколько суток). При этом не всегда удается удалять даже относительно крупные частицы загрязнений (10...30 мкм), наиболее опасные для гидравлических каналов. Наиболее трудоемкими для очистки являются детали со сложной внутренней поверхностью, имеющие глухие отверстия и пазы, выполненные на резьбовой поверхности, а также пересечения отверстий малого диаметра, т.е. характерные для высокоточных агрегатов авиационной техники [2].

Существующие методы с такими требованиями не справляются. Методы, основанные на очищении потоком жидкости непроизводительны и не могут в полной мере обеспечить удаление микрочастиц из каналов сложной формы. Часто методы очистки сами являются источниками вторичных загрязнений (лезвийные и абразивные методы), требуют специальной технологической оснастки

(электрохимический, экструзионно-абразивный методы и др.). Это затрудняет автоматизацию процесса очистки и ограничивает применение этих методов для задач ремонта военной техники. Поэтому разработка более эффективных методов очистки высокоточных деталей остается остроактуальной.

Среди термических методов очистки, рассмотренных в работе [3] (лазерный, плазменный, электронно-лучевой, ионный, детонационный) для целей очистки агрегатов военной техники в наибольшей степени подходит лазерный и газодетонационный методы. Однако лазерный метод, способный удалять как химические загрязнения, так и микрочастицы, эффективен только для очистки внешней поверхности деталей [4].

Назначение режимов детонационной очистки на основе экспериментов является практически неразрешимой задачей, поскольку требует учета большого числа факторов и требует оценка качества очистки внутренних полостей. Поэтому перспективной является разработка методики назначения режимов очистки интенсивными тепловыми потоками на основе математического моделирования удаления микрочастиц с поверхности. Это требует разработки моделей, которые с одной стороны, обеспечивали бы достаточную точность, а с другой – были бы достаточно эффективными с точки зрения вычислительных затрат. Такие модели в первую очередь должны учитывать особенности взаимодействия микрочастиц и поверхности деталей, среди которых основное значение имеет адекватный учет сил адгезии. Известные на сегодняшний день работы, посвященные моделированию отрыва микрочастиц потоком газа, в том числе ударными волнами эту задачу либо не рассматривают [5], либо используют в построениях модели адгезии, выбранные без достаточного обоснования [6]. Поэтому выбор модели для описания сил адгезии, в наибольшей степени соответствующей условиям очистки деталей авиационной техники от микрочастиц, рассматривается в качестве первоочередной задачи построения математической модели детонационной очистки.

Силы адгезии при очистке от микрочастиц

Некоторые модели механики сплошных сред для контакта упругих шаров в присутствии поверхностных сил нашли применение в описании трения резины, агломерации микрочастиц, а в интерпретации экспериментов с использованием аппаратов измерения поверхностных сил и атомно-силовых микроскопов.

Обычно считается, что поверхностная сила p_a (считаемая положительной при сжатии) зависит от расстояния между атомными плоскостями z и может быть описана законом, полученным исходя из потенциала Леннарда-Джонса:

$$p_a(z) = \frac{8w}{3z_0} \left[\left(\frac{z}{z_0} \right)^{-9} - \left(\frac{z}{z_0} \right)^{-3} \right], \quad (1)$$

где z_0 – равновесное расстояние; w – работа адгезии (обычно определяемая через значения поверхностных энергий как $w = \Delta\sigma = \sigma_1 + \sigma_2 - \sigma_{12}$).

Для случая жестких сфер согласно Брэдли [7] полная сила задается выражением:

$$P_a = \frac{8\pi wR}{3} \left[\frac{1}{4} \left(\frac{z}{z_0} \right)^{-8} - \left(\frac{z}{z_0} \right)^{-2} \right], \quad (2)$$

где $R = (1/R_1 + 1/R_2)^{-1}$ – приведенный радиус сфер.

Исходя из этого выражения максимальное значение силы адгезии P_c – усилие отрыва, определяемое при $z = z_0$, равно $2\pi wR$.

Учет упругой деформации сфер при анализе впервые был введен Джонсоном, Кендалом и Робертсом (модель JKR) [8] а также Дерягиным, Мюллером и Топоровым (модель DMT) [9]. Эти две модели существенно различаются, что в свое время привело к резкой дискуссии, пока Тейбор не указал [10], что обе эти модели справедливы как крайние варианты более общей модели для противоположных значений параметра

$$\mu = \left(\frac{Rw^2}{E_*^2 z_0^3} \right)^{1/3}, \quad (3)$$

где $E_* = \left[(1 - \nu_1^2)/E_1 + (1 - \nu_2^2)/E_2 \right]^{-1}$ – комбинированный модуль упругости сфер, а ν_1, ν_2 – коэффициенты Пуассона материала сфер.

Параметр μ представляет собой отношение упругого смещения поверхностей, вызванного силами адгезии, к эффективному радиусу действия поверхностных сил, определяемому величиной z_0 . Теория JKR относится к крупным податливым сферам, т.е. большим значениям μ , в то время как теория DMT соответствует случаю малых, жестких сфер, т.е. низким значениям μ .

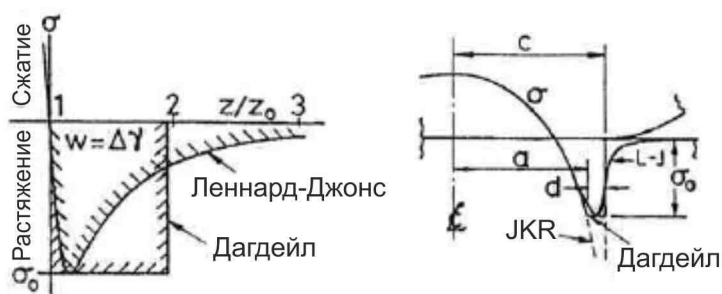


Рис. 1. Изменения сил отрыва и распределение силы сцепления на границе контакта сферы с плоскостью для разных моделей контакта с адгезией

На переходе между этими двумя крайностями требуется более сложная формулировка: упругая деформация поверхностей должна быть согласована с потенциалом поверхностной силы по всей области взаимодействия. Решение этой задачи с использованием потенциала Леннарда-Джонса (рис. 1), было получено Мюллером с соавторами (модель MYD)

[11]. Они показали, что величина усилия отрыва P_c изменятся непрерывно от величины $-2\pi wR$ по модели DMT для значений $\mu < 0,1$, до $-1,5\pi wR$ по модели JKR для $\mu > 5$ (рис. 2). Объемные численные расчеты DMT-JKR перехода были проведены Гринвудом [12]. Полученная зависимость изменения усилия отрыва показаны на рис. 2.

Дополнением к исследованиям по этой проблеме стала работа Маугиса [13]. Представляя силу адгезии в приближении Дагдейла, в котором сила отрыва сила

является постоянной σ_0 в интервале $z_0 \leq (z_0 + h) \leq (z_0 + h_0)$, а поверхность бесконечно жесткой на сжатие, им было получено решение в замкнутой форме.

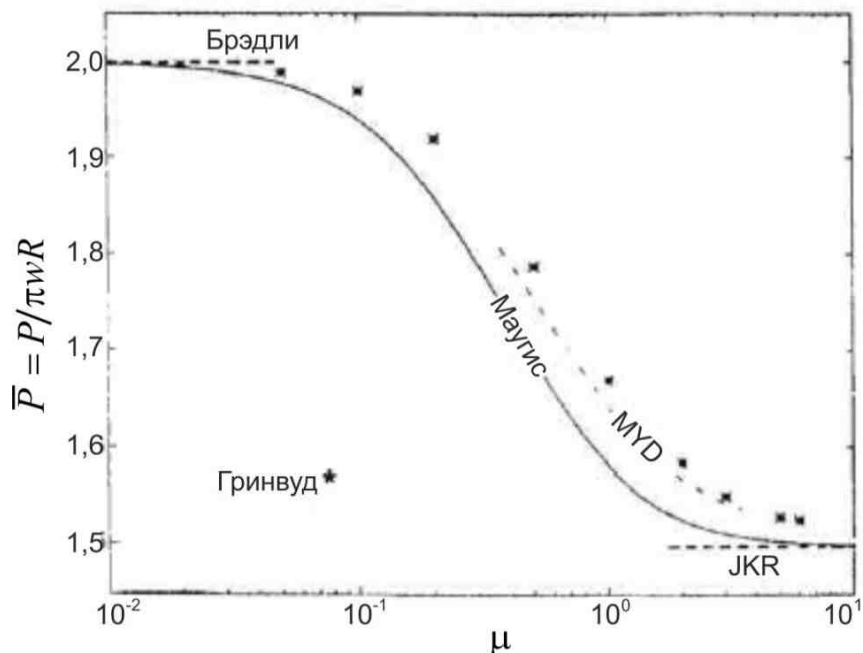


Рис. 2. Изменение силы отрыва в зависимости от параметра упругости μ

Параметр перехода λ был определен Маугисом в виде:

$$\lambda = \sigma_0 \left(\frac{9R}{2\pi w E_*^2} \right). \quad (4)$$

Значение σ_0 автором было выбрано из условия соответствия решению, получаемому с использованием потенциала Леннарда-Джонса, который дает $h_0 = 0,97z_0$. Это означает, что λ также является мерой отношения упругой деформации к поверхностной силе и связано с μ как $\lambda = 1,16\mu$.

В силу своей широкой применимости подход Маугиса-Дагдейла (MD модель) будет использоваться для построения карты, которая будут отображать условия, при которых возможно применение различных приближенных моделей контакта с адгезией.

Круговой контакт между сферами с приведенным радиусом $R = (1/R_1 + 1/R_2)^{-1}$ описываемый теорией Маугиса-Дагдейла, показан на рис. 3. Плотный контакт сохраняется в центральной области радиусом a ; силы адгезии интенсивностью σ_0 действуют до радиуса c . В кольце $a < r < c$ поверхности отделены на расстояние, возрастающее от нуля до h_0 .

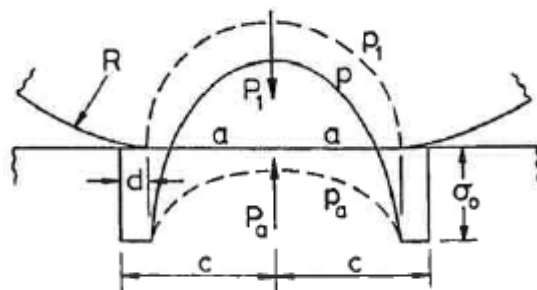


Рис. 3. Распределение поверхностных усилий в модели Маугиса-Дагдейла

Распределение поверхностной силы складывается из двух слагаемых.

– Давление Герца, связанное с контактом по радиусу a :

$$p_1(r) = (3P_1 / 2\pi a^2) (1 - (r/a)^2)^{1/2}, \quad (5)$$

где

$$P_1 = 4E_* a^3 / 3R, \quad (6)$$

упругое сжатие

$$\delta_1 = u_{z1}(0) = a^2 / R, \quad (7)$$

нормальное смещение при $r = c$

$$u_{z1}(c) = (1 / \pi R) \left((2a^2 - c^2) \sin^{-1}(a/c) + a\sqrt{c^2 - a^2} \right), \quad (8)$$

и зазор между поверхностями

$$h_1(c) = c^2 / 2R - \delta_1 + u_{z1}(c). \quad (9)$$

– Напряжения адгезии (Дагдейла):

$$p_a(r) = \begin{cases} -(\sigma_0 / \pi) \cos^{-1} \left(\frac{2a^2 - c^2 - r^2}{c^2 - r^2} \right), & r \leq a, \\ -\sigma_0, & a \leq r \leq c \end{cases}, \quad (10)$$

где сила адгезии определяется как

$$P_a = -2\sigma_0 c^2 \left(\cos^{-1}(a/c) + a\sqrt{c^2 - a^2} \right), \quad (11)$$

упругое сжатие

$$\delta_a = -(2\sigma_0 / E_*) \sqrt{c^2 - a^2}, \quad (12)$$

и зазор между поверхностями при $r = c$

$$h_a(c) = (4\sigma_0 / \pi E_*) \left(\sqrt{c^2 - a^2} \cos^{-1}(a/c) + a - c \right). \quad (13)$$

Суммарное давление $p(r)$, действующее в области контакта, получается суммированием давлений, заданных выражениями (5) и (10), как показано на рис. 3. Аналогично, общее контактное усилие $P = P_1 + P_a$. Сила адгезии по Дагдейлу становится равной нулю, когда расстояние между поверхностями достигает величины h_0 . В этом случае можно записать, что

$$h(c) = h_1(c) + h_a(c) = h_0 = w / \sigma_0. \quad (14)$$

Введем безразмерные параметры, предложенные Маугисом:

$$\left. \begin{aligned} \bar{a} &= a \left(\frac{4E_*}{3\pi w R^2} \right)^{1/3}; & \bar{c} &= c \left(\frac{4E_*}{3\pi w R^2} \right)^{1/3} \\ \bar{A} &= \pi c^2; & \bar{P} &= \frac{P}{\pi w R}; & \bar{\delta} &= \delta \left(\frac{4E_*}{3\pi w R^2} \right)^{2/3} \end{aligned} \right\}. \quad (15)$$

Подставляя в уравнение (14) выражения в (9) и (13), используя введенные безразмерные параметры и λ из выражения (4), получим:

$$\frac{\lambda \bar{a}^2}{2} \left[(m^2 - 2) \sec^{-1} m + \sqrt{m^2 - 1} \right] + \frac{4\lambda^2 \bar{a}}{3} \left[\sqrt{m^2 - 1} \sec^{-1} m - m + 1 \right] = 1, \quad (16)$$

где $m = c/a$.

Из выражений (6) и (11) суммарное контактное усилие может быть представлено в виде:

$$\bar{P} = \bar{P}_1 + \bar{P}_a = \bar{a}^3 - \lambda \bar{a}^2 \left(\sqrt{m^2 - 1} + m^2 \sec^{-1} m \right), \quad (17)$$

и из уравнений (7), (12) полное упругое сжатие составит

$$\bar{\delta} = \bar{a}^2 - (4/3)\lambda \bar{a} \sqrt{m^2 - 1}. \quad (18)$$

Изменение \bar{c} и \bar{a} , вызванные нагрузкой \bar{P} для любого конкретного значения λ находится из совместного решения уравнений (17) и (18).

На основе уравнений Маугиса-Дагдейла (MD), в работе для определения границ возможного применения различных моделей контакта с адгезией [6] была построена карта адгезии (рис. 4). Одной из координат карте является параметр упругости λ , второй – величина $\bar{P} = P/\pi w R$, которая является мерой соотношения нагрузки к усилия адгезии. Используем эту диаграмму для выбора модели адгезии для случая удаления микрочастиц.

В работе [14] указывается, что для большинства металлов значение поверхностной энергии имеет порядок величины $\sigma \approx 1 - 2$ Дж/м², и межатомное расстояние $z_0 \approx 4 \cdot 10^{-10}$ м. С учетом этих данных, подставим значения модуля упругости и коэффициента Пуассона, характерные для высокоточных деталей авиационной техники (золотники, плунжеры и другие прецизионные детали агрегатов). Тогда рассматривая адгезионный контакт микрочастиц размером 1...50 мкм, в системе координат, принятой для диаграммы, приведенной на рис. 4, зона, соответствующая условиям адгезионному контакту микрочастиц и поверхности, находится на границе применения DMT модели (затонированная область).

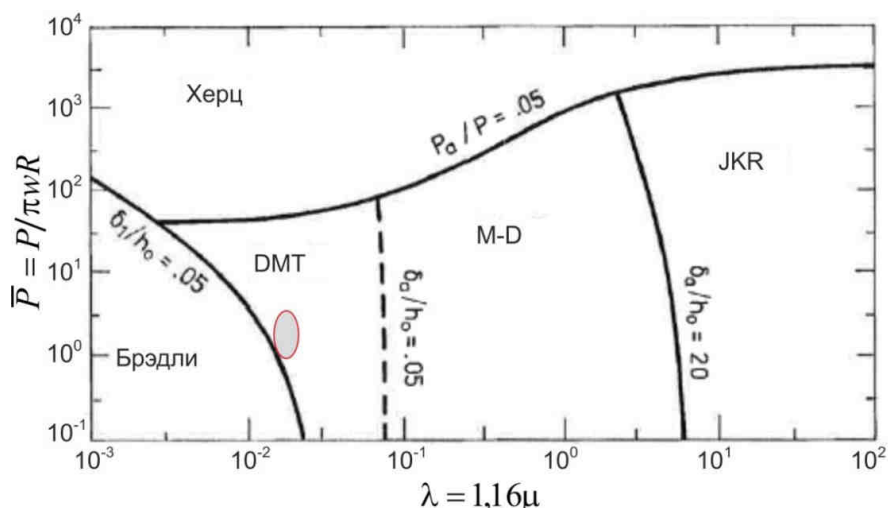


Рис. 4. Карта адгезии

Такой результат получен в ходе расчетов, выполненных с учетом того, что для микрочастиц указанного диапазона размеров вес на порядки меньше сил адгезии и им можно пренебречь.

Заключение

Таким образом, для моделирования взаимодействия микрочастиц, находящихся в адгезионном контакте с поверхностью детали, с ударными волнами, возникающими при детонационной очистке, силу адгезии следует учитывать согласно DMT модели. Такой результат отличается от допущений, принятых для исследования отрыва микрочастиц потоком газа, сделанных в большинстве выполненных ранее работ (например, [6]), в которых применялась JKR модель.

Список литературы

1. Степанов, В.А. Разработка и исследование методов и средств комплексной диагностики, смазываемых узлов трения газотурбинных двигателей по параметрам продуктов износа в масле [Текст] : дис. ... д-ра техн. наук : 05.04.12, 05.02.04 : защищена 15.09.2000 : утв. 08.12.2000 / Степанов Виктор Александрович. – М., 2000. – 363 с.
2. Жданов, А.А. Обеспечение качества гидротопливных агрегатов летательных аппаратов за счет новых технологий [Текст] / А.А. Жданов // Технологические системы. – 2002. – № 5. – С.9 – 13.
3. Современные методы финишной очистки интенсивными потоками энергии [Текст] : монография / О.В. Шипуль, Е.В. Цегельник, А.О. Гарин [и др.]. – Х.: Нац. аэрокосм. ун-т им. Н.Е. Жуковского «Харьк. авиац. ин-т», 2013. – 189 с.
4. Перспективы лазерной очистки при ремонте ГТД [Текст] / С.И. Планковский, Е.В. Цегельник, И.И. Головин, П.И. Мельничук // Авиационно-космическая техника и технология. – 2015. – № 10 (127). – С. 54 – 57.
5. Гостеев, Ю.А. К расчету подъема пыли проходящей ударной волной [Текст] / Ю.А. Гостеев, А.В. Федоров // Физика горения и взрыва. – 2002. – Т. 38, № 3. – С. 80 – 84.
6. Zoetewij, M.L. Particle removal in linear shear flow: model prediction and experimental validation [Текст] / M.L. Zoetewij, J.C. Van der Donck, R. Versluis // Journal of Adhesion Science and Technology. – 2009. – Vol. 23, Iss. 6. – P. 899 – 911.
7. Bradley, R.S. The cohesive force between solid surfaces and the surface energy of solids [Текст] / R.S. Bradley // The London, Edinburgh, and Dublin Philosophical Magazine and Journal of Science – 1932. – Vol. 13, Iss. 86. – P. 853 – 862.
8. Johnson, K.L. Surface energy and the contact of elastic solids [Текст] / K.L. Johnson, K. Kendall, A.D. Roberts // Proceedings of the Royal Society of London A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences. – 1971. – Vol. 324, No. 1558. – P. 301 – 313.
9. Derjaguin, B.V. Effect of contact deformation on the adhesion of particles [Текст] / B.V. Derjaguin, V.M. Muller, Yu.P. Toporov // Journal of Colloid and Interface Science. – 1975. – Vol. 53, Iss. 2. – P. 314 – 326.
10. Tabor, D. Surface forces and surface interactions [Текст] / D. Tabor // Journal of Colloid and Interface Science. – 1977. – Vol.58, Iss. 1. – P. 2 – 13.
11. Muller, V.M. On the influence of molecular forces on the deformation of an elastic sphere and its sticking to a rigid plane [Текст] / V.M. Muller, V.S. Yushenko, B.V. Derjaguin // Journal of Colloid and Interface Science. – 1980. – Vol. 77, Iss. 1. – P. 91 – 101.

12. Greenwood, J.A. Adhesion of elastic spheres [Текст] / J.A. Greenwood // Proceedings of the Royal Society of London A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences. – 1997. – Vol. 453, Iss. 1961. – P. 1277 – 1297.

13. Maugis, D. Adhesion of spheres: The JKR-DMT transition using a Dugdale model [Текст] / D. Maugis // Journal of Colloid and Interface Science. – 1992. – Vol. 150, Iss. 1. – P. 243 – 269.

14. Попов, В.Л. Механика контактного взаимодействия и сила трения. От нанотрибологии до динамики землетрясений [Текст] / В.Л. Попов. – М.: Физматлит, 2013. – 352 с.

Поступила в редакцию 16.06.2016

Аналіз моделей адгезії при очистці поверхонь деталей авіаційної техніки від мікрочастинок

У роботі представлено методику вибору моделі для опису сил адгезії, яка найбільшою мірою відповідає до умов очищення деталей авіаційної техніки від мікрочастинок. Показано, що для моделювання взаємодії мікрочастинок, які перебувають у адгезійному контакті з поверхнею деталі, з ударними хвилями, які виникають при детонаційному очищенні, силу адгезії слід враховувати згідно DMT моделі.

Ключові слова: очищення поверхні, сили адгезії, мікрочастинок.

Analysis of Microparticles Adhesion Models at Cleaning of Aircraft Parts Surfaces

The paper presents a methodology for selecting a model to describe the adhesion forces, which most corresponding to conditions of microparticles cleaning from the aircraft parts. It is shown that adhesion force should be considered according DMT model for the simulation of microparticles interaction which are in adhesive contact with the surface of the part, with the shock waves arising during detonation cleaning.

Keywords: surface cleaning, adhesion forces, microparticles.

Сведения об авторах:

Цегельник Евгений Владимирович – канд. техн. наук, старший научный сотрудник кафедры теоретической механики, машиноведения и роботомеханических систем, Национальный аэрокосмический университет им. Н.Е. Жуковского «Харьковский Авиационный Институт», Украина.

Кузнецов Игорь Борисович – канд. техн. наук, доцент, заместитель начальника института оперативного обеспечения и логистики, Национальный университет обороны Украины им. Ивана Черняховского, Украина.

Мельничук Петр Иванович – заместитель директора Государственного предприятия «Антонов», Украина.

Малашенко Владимир Львович – канд. техн. наук, старший преподаватель кафедры технологии производства летательных аппаратов, Национальный аэрокосмический университет им. Н.Е. Жуковского «Харьковский Авиационный Институт», Украина.