

К вопросу о разработке модели ультразвуковой экспресс-диагностики материалов

10, октябрь 2013

DOI: 10.7463/1013.0604128

Ковалев А. А., Тищенко Л. А., Савенков Ф. А.

УДК 620.11

Россия, МГТУ им. Н.Э. Баумана

kovalevarta@gmail.com

leonid.tichenko@gmail.com

safiar@inbox.lv

ВВЕДЕНИЕ

В настоящее время в связи с необходимостью повышения конкурентоспособности отечественной промышленности актуальной задачей является разработка методики рационального выбора материала деталей, эксплуатируемых в различных условиях.

Для обоснованного выбора материала, максимально адаптированного под конкретные условия эксплуатации деталей, и рациональной технологии изготовления деталей на стадии конструкторско-технологического проектирования целесообразно применять комплексные методы диагностики, позволяющие одновременно учитывать различные механизмы разрушения материала.

Одним из методов, позволяющим осуществлять ускоренное определение износостойкости материалов, является ультразвуковая экспресс-диагностика, основанная на анализе данных об изменении физико-механических свойств, массы и геометрии приповерхностного слоя материала, вследствие воздействия на него гидроабразивной струи с известными кинематическими параметрами. На сегодняшний день вопросам взаимодействия гидроабразивной струи с различными материалами посвящены многочисленные работы Hashish M, Momber N, Тихомирова Р.А., Барсукова Г.В., Петухова Е.Н, Барзова А.А. и др. При этом зачастую отсутствуют систематизированные данные, позволяющие проводить сравнительный анализ моделей взаимодействия гидроабразивной струи с различными материалами.

В статье приводится обзор существующих моделей оценки эрозии материала под воздействием гидроабразивной струи.

Цель работы состоит в проведении сравнительного анализа существующих моделей оценки эрозии материала под воздействием гидроабразивной струи и выработки рекомендаций для дальнейшей разработки перспективной универсальной модели, позволяющей адекватно прогнозировать ресурс ответственных деталей изделий, эксплуатирующихся в условиях воздействия агрессивных многокомпонентных сред.

1. Сущность метода ультразвуковой диагностики

Ультразвуковая диагностика основана на взаимодействии высокоскоростной струи жидкости и мелкодисперсного абразива с поверхностью образцов различных материалов. В результате воздействия струи возникает эрозия материала. Эрозия – это унос массы того или иного вещества в виде отдельных частиц или целых слоев. В результате эрозии в материале возникают каверны. Схема процесса ультразвуковой диагностики приведена на рисунке 1.

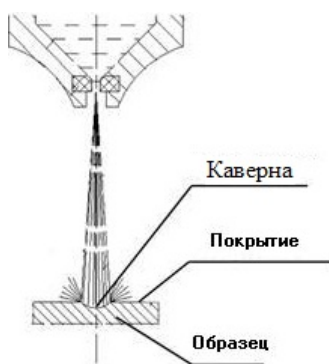


Рис. 1. Общая схема ультразвуковой диагностики

Для различных материалов механизм их разрушения разный в зависимости от свойств материалов и параметров нагружения. Поэтому по степени и характеру разрушения можно судить о целесообразности применения диагностируемого материала в конкретных условиях эксплуатации.

Для разработки методики ультразвукового экспресс-диагностирования износостойкости материалов необходимо создать математическую модель, адекватно описывающую механизм разрушения конкретного материала под воздействием ультразвука.

На рисунке 2 представлена схема упрощенной модели расчёта эрозии. Модель должна учитывать влияние внешней среды, т.е. условия, в которых материал будет эксплуатироваться: тип среды, давление, температура, наличие твёрдых частиц, кавитация

и т.д. Необходимо учитывать свойства диагностируемого материала: плотность, твёрдость, параметры прочности, микроструктуру и др. Кроме того, необходимо знать критерий разрушения материала. Поскольку эрозия является динамическим процессом, наиболее подходящим является структурно-временной критерий разрушения.

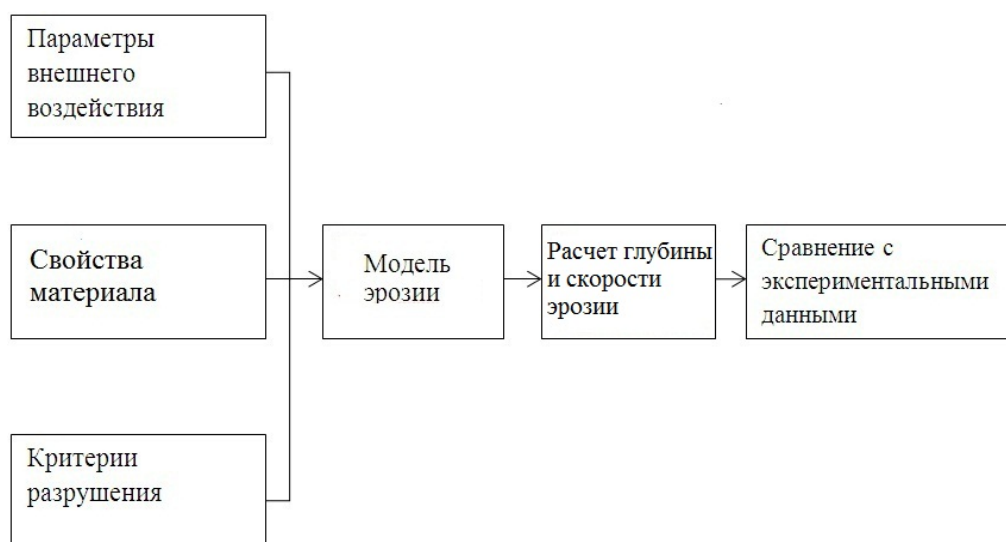


Рис. 2. Схема упрощённой модели расчёта эрозии

При проведении диагностики используются образцы материалов, износостойкость которых требуется определить. Образцы необходимо взвесить на аналитических весах с точностью до 0,001 г и затем закрепить в держателях на гидроструйной установке. Выставляется режим диагностирования: рабочее давление, скорость струи, угол атаки, расстояние между образцом и срезом сопла гидроструйной установки. В результате взаимодействия струи с материалом происходит его поверхностное разрушение и вымывание с него образовавшейся массы частиц материала. После этого проводится повторное взвешивание образцов. Затем можно определить объём удалённого материала.

Определим требования к математической модели, характеризующей процесс ультраструйной диагностики.

Поскольку внешняя среда на установке имитируется с помощью ультраструи, параметрами внешнего воздействия являются параметры струи: её скорость, диаметр, угол атаки, расстояние от среза сопла до диагностируемого образца, а также параметры материала абразива (твёрдость и форма частиц абразива). Это - входные параметры модели. Опираясь этими данными, на выходе модели необходимо получить массу частиц материала, унесённых в результате эрозии, или объём удалённого материала. Затем через

массу (объём) рассчитывается скорость эрозии, по значению которой можно судить об износостойкости диагностируемого материала.

Рассмотрим различные математические модели процесса взаимодействия ультразвука с поверхностью диагностируемого материала.

2. Модели, основанные на механизме эрозии материалов

Для пластичных материалов иранским учёным Хашишем [1] были созданы модели, описывающие глубину разрушения и глубину деформации материала. Аналитические выражения для них имеют вид

$$h_c = \frac{\left(\frac{v_0}{C_k}\right) d_j}{\left(\frac{\pi \rho_p u d_j^2}{14 m_a}\right)^{2/5} + \left(\frac{v_e}{C_k}\right)},$$

$$h_d = \frac{1}{\left(\frac{\pi d_j \sigma_f u}{2 C_1 m_a (v_0 - v_e)^2}\right) + \left(\frac{C_f}{d_j}\right) \left(\frac{v_0}{v_0 - v_e}\right)},$$

где v_0 – скорость удара частицы, d_j – диаметр ультразвука, ρ_p – плотность частицы, u – поперечная скорость движения сопла, m_a – массовая скорость потока абразива, v_e – пороговая скорость частиц абразива, при которой начинается разрушение материала, σ_f – предел текучести материала, C_f – коэффициент трения абразива о стенки гидрокаверны, C_1 – константа, C_k – параметр, характеризующий сочетание свойств частиц абразива и исследуемого материала

$$C_k = \sqrt{\frac{3 \sigma_f R_f^{3/5}}{\rho_p}}.$$

Здесь σ_f – предел текучести материала, R_f – коэффициент закругленности частицы, т.е. отношение среднего диаметра угла частицы к диаметру максимального вписанного круга, ρ_p – плотность частицы.

Результаты, полученные с помощью этой модели, довольно точно согласуются с экспериментальными данными.

Другая модель разработана Зенгом и Кимом [2] для хрупких материалов на основе явления разрушения керамики. Её аналитическое выражение имеет вид

$$h = \left(\frac{\eta C_v C_y}{1 + t_r}\right)^2 \left(\frac{C m_a P}{\rho_w d_n u}\right) \left(\frac{2 f_w \beta D \sigma_f \alpha^2}{3 \gamma E} + \frac{\alpha}{\sigma_f}\right),$$

где η – мгновенная эффективность передачи энергии, C_v – коэффициент эффективности сопла, C_y – коэффициент сжимаемости струи, t_r – соотношение скоростей потока воды и массы абразива, C – коэффициент эффективности воздействия, m_a – массовая скорость

потока абразива, P – давление воды, ρ_w – плотность воды, d_n – диаметр сопла, u – поперечная скорость движения сопла, f_w – часть энергии эффективного волнового напряжения, β – некая функция, зависящая от свойств материала, D – диаметр частицы абразива, σ_f – предел текучести материала, α – угол атаки струи, γ – отношение энергии разрушения к единице площади поверхности, E – модуль Юнга исследуемого материала.

Существует также модель, где в качестве входного параметра используется вязкость разрушения K_c , характеризующая устойчивость материала к разрушению. Эту модель разработал Абдель-Рахман [3] для определения глубины разрушения материала ультразвукой с абразивом. Её выражение имеет вид

$$h = Bg(\alpha_e) \left(\frac{1}{ud_j} \right) (m_a v_0 r^{2/3} \rho^{2/9} K_c^{-4/3} H^{1/9}),$$

где B – константа, $g(\alpha_e)$ – функция, зависящая от угла атаки α_e струи, u – поперечная скорость движения сопла, d_j – диаметр сопла, m_a – массовая скорость потока абразива, v_0 – скорость удара частицы, r – радиус частицы, ρ – плотность частицы, K_c – вязкость разрушения, H – твердость по Виккерсу исследуемого материала.

3. Модели, основанные на энергетическом подходе к процессу гидроструйной диагностики поверхности

В таких моделях предполагается, что скорость удаления ультразвукой исследуемого материала пропорциональна кинетической энергии частиц абразива.

Одна из таких моделей была разработана Ченом [4] для получения глубины разрушения

$$h_c = 0.88 \left(\frac{m_a P^{0.51}}{u^{0.27}} \right).$$

Здесь m_a – массовая скорость потока абразива, P – давление воды, u – поперечная скорость движения сопла.

Другая модель предложена Вангом [5]:

$$h = k \frac{m_a^{1-\alpha_1} P^{1-\alpha_2}}{d_j u^{1-\alpha_3} \rho_w}.$$

Здесь m_a – массовая скорость потока абразива, P – давление воды, d_j – диаметр сопла, u – поперечная скорость движения сопла, ρ_w – плотность воды, k , α_1 , α_2 , α_3 – некоторые константы.

Модели, основанные на энергетическом подходе к процессу гидроструйной диагностики поверхности, очень просты и удобны для расчетов, но они не обладают достаточной точностью из-за пренебрежения потерями энергии.

4. Модель, основанная на эрозии при взаимодействии ультразвууи с вращающимся валиком

Итак, были рассмотрены различные математические модели процесса взаимодействия ультразвууи с диагностируемым материалом. Эти модели не полностью отвечают требованиям, предъявляемым к модели ультразвууиной диагностики материала, так как выходом этих моделей является глубина каверны, в то время как было бы удобнее получать массу материала, удаленного при эрозии. К тому же, все эти модели являются эмпирическими, поскольку предполагают использование данных, получаемых экспериментальным путем. Это приводит к тому, что перед экспресс-диагностикой необходимо проводить дополнительные испытания, которые увеличивают общее время подбора материала и не всегда возможны.

Поэтому предлагается к рассмотрению еще одна модель ультразвууиной диагностики материала.

Методика гидроабразивного вращения включает в себя оценку объёма материала, удаленного в результате удара абразивных частиц.

Предполагается, что при гидроабразивном вращении струя со скоростью V ударяется о поверхность крутящегося валика, скорость которого равна N оборотам в минуту, а начальный диаметр равен D . Расстояние между осью струи и осью образца называется радиальным положением струи x . α – локальный угол удара (угол атаки), который струя составляет с тангенциальной поверхностью в точке удара (рисунок 3) [6].

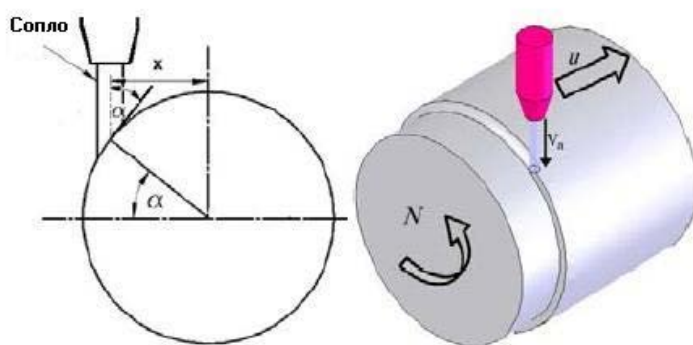


Рис. 3. Схема гидроабразивного вращения

Угол α может быть посчитан по формуле

$$\alpha = \cos^{-1}\left(\frac{2x}{D}\right).$$

Вращение с гидроабразивной обработкой примерно эквивалентно удару наклонной струи о плоскую поверхность, которая движется со скоростью, равной касательной скорости к поверхности вращающегося образца.

Смоделируем движение гидроабразивной струи. Рассмотрим для этого скорости водной струи и частиц абразива.

Вода, находящаяся под высоким давлением, проходя через отверстие, создает высокоскоростную ультраструю, в которой гидравлическая энергия преобразуется в кинетическую. Запишем закон Бернулли

$$P_{atm} + \frac{\rho_w}{2} V_{th}^2 + \rho_w g h_1 = P + \frac{\rho_w}{2} V_{pipe}^2 + \rho_w g h_2, \quad (1)$$

где P_{atm} – атмосферное давление, ρ_w – плотность воды, принимаемая 1000 кг/м^3 , V_{pipe} – скорость до выхода из отверстия, V_{th} – теоретическая скорость после выхода из отверстия, P – водяное давление до выхода из отверстия, h_1 и h_2 – высота двух точек на образце после и до воздействия соответственно.

Предположим, что $h_1 - h_2 \approx 0$, $P \gg P_{atm}$ и $V_{th} \gg V_{pipe}$.

Потери скорости происходят из-за трёх явлений: трения о стенки, возмущения жидкости, сжимаемости воды. Преобразовывая (1) и добавляя коэффициент C_v , получаем выходную скорость струи воды:

$$V_w = C_v \sqrt{\frac{2P}{\rho_w}}. \quad (2)$$

Теперь найдём скорость частиц абразива, используя закон сохранения импульса

$$m_a V_{a0} + m_w V_w + m_L V_L = (m_a + m_L + m_w) V_a,$$

где m_a , m_w и m_L – массовые скорости потока абразива, воды и воздуха соответственно, V_{a0} и V_L – входные скорости абразива и воздуха соответственно, V_a – выходная скорость ультраструи.

Пренебрежем количеством воздуха $m_a \approx 0$, положим, что $V_{a0} \ll V_a$. Введём коэффициент эффективности передачи момента φ , учитывающий потери, возникшие в ходе воздействия. Тогда скорость абразивных частиц определяет формула

$$V_a = \varphi \frac{V_w}{[1 + (\frac{m_p}{m_w})]}.$$

Финни [7] получил модель эрозии в случае взаимодействия одной частицы абразива с поверхностью материала. В модели рассматривается твёрдая частица, движущаяся со скоростью V_a и ударяющая о поверхность под углом α . Материал поверхности упруго-пластичный. Конечное выражение для объёма материала, удаленного из образца за время удара отдельной частицы, имеет вид

$$Q = \begin{cases} \frac{mV^2}{\psi p k} \left[\sin(2\alpha) - \frac{6}{k} \sin^2(\alpha) \right], & \tan \alpha \leq \frac{k}{6}, \\ \frac{mV^2}{\psi p k} \left[\frac{k \cos^2(\alpha)}{6} \right], & \tan \alpha > \frac{k}{6}, \end{cases}$$

где α – угол удара, k – соотношение вертикальных и горизонтальных компонент силы, ψ – отношение глубины контакта l к глубине реза y_t , как показано на рисунке 4, p – давление на материал образца, а Q – объём удаленного материала.



Рис. 4. Процесс взаимодействия абразивной частицы с поверхностью образца

Общий объём, удаленный частицами с общей массой M , равен

$$Q = \begin{cases} \frac{MV^2}{\psi p k} \left[\sin(2\alpha) - \frac{6}{k} \sin^2(\alpha) \right], & \tan \alpha \leq \frac{k}{6}, \\ \frac{MV^2}{\psi p k} \left[\frac{k \cos^2(\alpha)}{6} \right], & \tan \alpha > \frac{k}{6}, \end{cases}$$

Хашиш [1] модифицировал модель Финни для эрозии. Он учёл в ней влияние формы частицы. Окончательная форма модели, которая больше пригодна для маленьких углов соударения имеет вид

$$Q = \frac{7}{\pi} \frac{M}{\rho_p} \left(\frac{V_a}{C_k} \right)^{2.5} \sin(2\alpha) \sqrt{\sin \alpha}.$$

Здесь коэффициент C_k может быть найден из выражения

$$C_k = \sqrt{\frac{3pR_f^{3/5}}{\rho_p}}, \quad (3)$$

где R_f – коэффициент закругленности частицы, ρ_p – плотность частиц абразива, p – давление воды.

Таким образом, описанная математическая модель соответствует требованиям, предъявляемым к модели процесса ультразвуковой диагностики материалов. Выходным параметром этой модели является удалённый объём, что удобно для количественного определения износостойкости материала. Более того, данная модель – аналитическая, то

есть для расчёта нет необходимости использовать данные, полученные экспериментальным путём.

Необходимо также отметить, что модель, основанная на эрозии при взаимодействии ультразвуки с вращающимся валиком, может быть использована для материалов с плоской поверхностью. При расчёте учитывается форма абразива, что повышает точность прогнозирования удалённого объёма материала.

Но модель не лишена недостатков. Она подходит лишь для пластичных материалов и рассматривает случаи с малыми углами атаки ультразвуки.

Заключение

В данной работе были рассмотрены различные математические модели процесса взаимодействия ультразвуки с материалом, показана возможность их использования для разработки модели, позволяющей адекватно прогнозировать ресурс ответственных деталей изделий из различных материалов, эксплуатирующихся в условиях воздействия агрессивных многокомпонентных сред.

Наиболее адекватной математической моделью, описывающей взаимодействие гидроабразивной струи с диагностируемым материалом, по мнению авторов, является модель, основанная на эрозии при взаимодействии ультразвуки с вращающимся валиком.

Список литературы

1. Hashish M. A modeling study of metal cutting with abrasive waterjets // Journal of Engineering Materials and Technology, Transactions of the ASME. 1984. Vol. 106, iss. 1. P. 88-100. DOI: 10.1115/1.3225682
2. Zeng J., Kim T.J. Development of an abrasive waterjet kerf cutting model for brittle materials // 11th Int. Conf. on Jet Cutting Technology, St. Andrews, Scotland, 1992. P. 483-501.
3. Adel A. Abdel-Rahman. A Closed-form Expression for an Abrasive Waterjet Cutting Model for Ceramic Materials // International Journal of Mathematical Models and Methods in Applied Sciences. 2011. Vol. 5, iss. 4. P. 722-729. Available at: <http://www.naun.org/multimedia/NAUN/m3as/20-018.pdf> , accessed 24.08.2013.
4. Chen L., Siores E., Wong W.C.K. Kerf characteristics in abrasive waterjet cutting of ceramic materials // International Journal of Machine Tools and Manufacture. 1996. Vol. 36, no. 11. P. 1201-1206. [http://dx.doi.org/10.1016/0890-6955\(95\)00108-5](http://dx.doi.org/10.1016/0890-6955(95)00108-5)
5. Wang J. Abrasive waterjet machining of polymer matrix composites – cutting performance, erosive process and predictive models // International Journal of Advanced Manufacturing Technology. 1999. Vol. 15. P. 757-768.

6. ZohourkariI., ZohoorM. An Erosion-based Modeling of Abrasive Waterjet Turning //World Academy of Science, Engineering and Technology. 2010. Vol. 38. P. 359-363.
7. Bitter J.G.A. A study of erosion phenomena: Part 1 // Wear. 1963. Vol. 6, iss. 1, P. 5-21.
[http://dx.doi.org/10.1016/0043-1648\(63\)90003-6](http://dx.doi.org/10.1016/0043-1648(63)90003-6)
8. Bitter J.G.A. A study of erosion phenomena: Part 2 // Wear. 1963. Vol. 6, iss. 3, P. 169-190.
[http://dx.doi.org/10.1016/0043-1648\(63\)90073-5](http://dx.doi.org/10.1016/0043-1648(63)90073-5)

Development of a model of ultra-jet instant diagnosis of materials

10, October 2013

DOI: 10.7463/1013.0604128

Kovalev A.A., Tischenko L.A., Savenkov F.A.

Bauman Moscow State Technical University, 105005, Moscow, Russian Federation

kovalevarta@gmail.com

leonid.tichenko@gmail.com

safiar@inbox.lv

This article deals with application of ultra-jet diagnosis of materials, which is one of the most promising and complex methods allowing one to estimate durability of materials instantly under various conditions. A review of existent mathematical models which allow one to evaluate the depth of a honeycomb originated on the surface of a material as a result of ultra-jet influence. Requirements to the ultra-jet interaction model and the material being diagnosed were determined. On the basis of these requirements a model which could be used in the technique of the ultra-jet instant diagnosis was proposed.

Publications with keywords: [ultra ink-jet express diagnostic](#), [wear resistance](#), [angle of attack](#), [erosion](#), [volume of removed material](#)

Publications with words: [ultra ink-jet express diagnostic](#), [wear resistance](#), [angle of attack](#), [erosion](#), [volume of removed material](#)

References

1. Hashish M. A modeling study of metal cutting with abrasive waterjets. *Journal of Engineering Materials and Technology, Transactions of the ASME*, 1984, vol. 106, iss. 1, pp. 88-100. DOI: 10.1115/1.3225682
2. Zeng J., Kim T.J. Development of an abrasive waterjet kerf cutting model for brittle materials. *11th Int. Conf. on Jet Cutting Technology*, St. Andrews, Scotland, 1992, pp. 483-501.
3. Adel A. Abdel-Rahman. A Closed-form Expression for an Abrasive Waterjet Cutting Model for Ceramic Materials. *International Journal of Mathematical Models and Methods in Applied Sciences*, 2011, vol. 5, iss. 4, pp. 722-729. Available at: <http://www.naun.org/multimedia/NAUN/m3as/20-018.pdf> , accessed 24.08.2013.

4. Chen L., Siores E., Wong W.C.K. Kerf characteristics in abrasive waterjet cutting of ceramic materials. *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, 1996, vol. 36, no. 11, pp. 1201-1206. [http://dx.doi.org/10.1016/0890-6955\(95\)00108-5](http://dx.doi.org/10.1016/0890-6955(95)00108-5)
5. Wang J. Abrasive waterjet machining of polymer matrix composites – cutting performance, erosive process and predictive models. *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 1999, vol. 15, pp. 757-768.
6. Zohourkari I., Zohoor M. An Erosion-based Modeling of Abrasive Waterjet Turning. *World Academy of Science, Engineering and Technology*, 2010, vol. 38, pp. 359-363.
7. Bitter J.G.A. A study of erosion phenomena: Part 1. *Wear*, 1963, vol. 6, iss. 1, pp. 5-21. [http://dx.doi.org/10.1016/0043-1648\(63\)90003-6](http://dx.doi.org/10.1016/0043-1648(63)90003-6)
8. Bitter J.G.A. A study of erosion phenomena: Part 2. *Wear*, 1963, vol. 6, iss. 3, pp. 169-190. [http://dx.doi.org/10.1016/0043-1648\(63\)90073-5](http://dx.doi.org/10.1016/0043-1648(63)90073-5)