

К. Е. АББАКУМОВ, д-р. техн. наук, проф.

А. В. ВАГИН

И. Г. СИДОРЕНКО

Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет
«ЛЭТИ» (Санкт-Петербург, Россия)

ИННОВАЦИОННАЯ МОДЕЛЬ ТРЕЩИНОПОДОБНОЙ НЕСПЛОШНОСТИ МЕТАЛЛУРГИЧЕСКОГО ПРОИСХОЖДЕНИЯ В ЛИСТОВОМ ПРОКАТЕ

Аннотация

В докладе изложены физические основы формирования инновационной модели трещиноподобной несплошности листового проката при учете образования граничных условий в приближении «линейного скольжения» в случае применения новой системы независимых параметров.

Ключевые слова: листовой прокат, трещиноподобный дефект, контактные жесткости, неполная передача упругих смещений.

Повышение интенсивности эксплуатации изделий машиностроения, внедрение новых технологий изготовления перспективных конструкционных материалов требуют дальнейшего совершенствования современных средств неразрушающего контроля и технических измерений. Как предложено в [1], проектирование эффективных средств контроля целесообразно проводить на основании результатов анализа уравнений акустических трактов для соответствующих методов контроля и измерений при наличии внедренной в тракт замещающей модели исследуемой неоднородности. Как известно, наиболее широкое распространение для этих целей получили модели, использующие приближения характерные для плоскостойких сред [2].

В частности, модель в виде плоскопараллельной прослойки инородного вещества использовалась при имитации графитовых включений в медных сплавах, заполненных расслоений в стальных листах и т.д. [2, 3].

Недостатком этой модели являлось отсутствие возможности учета нарушения условий жесткого «сварного» контакта на границе прослойки и вмещающего металла. Такая возможность появилась с формированием граничных условий в приближении «линейного скольжения», допускающих формирование разрывов при передаче упругих смещений при непрерывности передачи упругих напряжений [2]. Например с использованием такой модели удалось описать свойства одного из самых «опасных видов протяженных несплошностей типа флокенов [2]. Отличительной особенностью формальной записи граничных условий в приближении «линейного скольжения» является появление новых параметров, характеризующих степень отклонения условий связи вещества включения и основного металла от «сварного контакта», а именно контактных жесткостей (податливостей): нормальной (KGN),

учитывающей «разрыв» в передаче нормальной компоненты смещений, и тангенциальной (KGT), учитывающей «разрыв» в передаче компонент упругих смещений в направлениях параллельных границе.

В частности, было показано [2], что для трещиноподобного дефекта с взаимодействующими «микрошероховатыми» «берегами» выражение для KGN может принимать вид:

$$KGN = \frac{(\lambda_1 + 2\mu_1)c_{11}}{2} \frac{2\pi\xi}{\omega d^2(1-\xi)}, \quad (1)$$

и по аналогии модуль тангенциальной контактной жесткости KGT имеет вид:

$$KGT = \frac{\mu_1 c_{11}}{2} \frac{2\pi\xi}{\omega d^2(1-\xi)}, \quad (2)$$

где ρ_1, λ_1, μ_1 – плотность и коэффициенты Ламэ для среды, вмещающей несплошность; $\omega = 2\pi f$ – круговая частота, а f – линейная частота; d – среднее расстояние между соседними микровыступами на контактирующих поверхностях; ξ – коэффициент перфорации: $\xi = 1 - b^2/d^2$, где b – средний размер участка с отсутствием контакта [2]. Величины d и ξ являются параметрами модели.

Как следует из результатов вычислений по (1) и (2) для большинства конструкционных материалов, в частности металлов, используемых на практике, при изменениях параметров модели в корректном диапазоне и значениях частоты в мегагерцевом диапазоне, значения контактных жесткостей лежат в пределах $10^{14} \dots 10^{18}$ н/м³, что обеспечивает описание плавного перехода от условий «сварного контакта» до «свободной» границы при формализованных преобразованиях. Недостатком предложенной модели являлось отсутствие в явном виде параметров шероховатости поверхностей микротрещин, что потребовало соответствующей доработки исходного объекта. При доработке модели было предложено замещать участки микровыступов шероховатой поверхности элементами поверхностей сферической формы по рекомендациям теории трибосистем [4]. В предположении малости высоты микровыступов сферической формы по сравнению с длиной волны, также в соответствии с другими рекомендациями в [5], было показано, что величина среднего расстояния между микровыступами может быть представлена в виде

$$d = 2\sqrt{2aRz - (Rz)^2}, \quad (3)$$

где a – радиус замещающего сферического микровыступа; Rz – величина шероховатости [5]. Кроме того, было показано, что средний радиус площади контактного пятна:

$$r \approx (2/3)\sqrt{2aRz}. \quad (4)$$

Откуда средняя площадь контактного пятна на микровыступе:

$$d^2 - b^2 \approx 2\pi r^2. \quad (5)$$

На рис. 1 и 2 в качестве примера представлены результаты вычислений по формулам (3) – (5) с учетом (1) и (2).

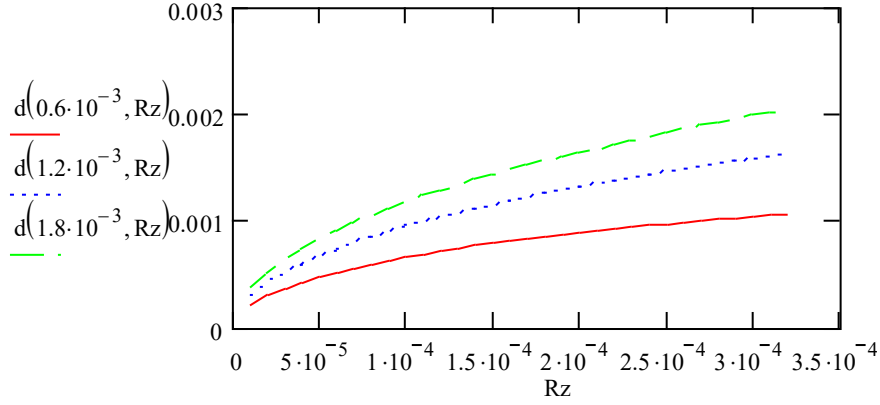


Рис. 1. Зависимость среднего расстояния между микровыступами от параметра шероховатости Rz при различных значениях радиуса сферического микровыступа: (—) – $a = 0,6$ мм; (····) – $a = 1,2$ мм; (----) – $a = 1,8$ мм, $f = 1$ МГц

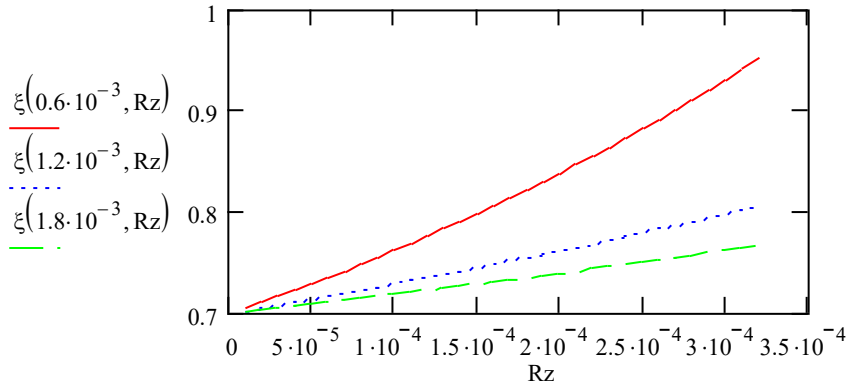


Рис. 2. Зависимость величины коэффициента перфорации от параметра шероховатости Rz при различных значениях радиуса сферического микровыступа: (—) – $a = 0,6$ мм; (····) – $a = 1,2$ мм; (----) – $a = 1,8$ мм, $f = 1$ МГц

Следует отметить, что рассмотренный подход привел к тому, что параметры d и ξ перестали быть независимыми, и для вычислений по формулам (1, 2) в них целесообразно перейти к параметрам: a – радиус замещающего сферического микровыступа, Rz – величина шероховатости.

С учетом этого формулы (1) и (2) примут вид:

$$KGN = \frac{(\lambda_1 + 2\mu_1)c_{fl}}{2} \frac{2\pi(4\pi a/9 \cdot \frac{1}{2a - Rz})}{\omega[4Rz(2a - Rz)](1 - 4\pi a/9 \cdot \frac{1}{2a - Rz})}, \quad (6)$$

$$KGT = \frac{\mu_1 c_{fl}}{2} \frac{2\pi(4\pi a/9 \cdot \frac{1}{2a - Rz})}{\omega[4Rz(2a - Rz)](1 - 4\pi a/9 \cdot \frac{1}{2a - Rz})}, \quad (7)$$

На рис. 3 и 4 представлены результаты вычислений по формулам (6) и (7). Как и следовало ожидать, величина контактной жесткости по направлению

нормали оказалась больше контактной жесткости в тангенциальном направлении, что корректно по физическим соображениям.

Полученные формулы (6, 7) можно использовать при вычислениях, например, коэффициентов отражения и прохождения через микрошероховатую границу раздела по аналогии с [4 - 6].

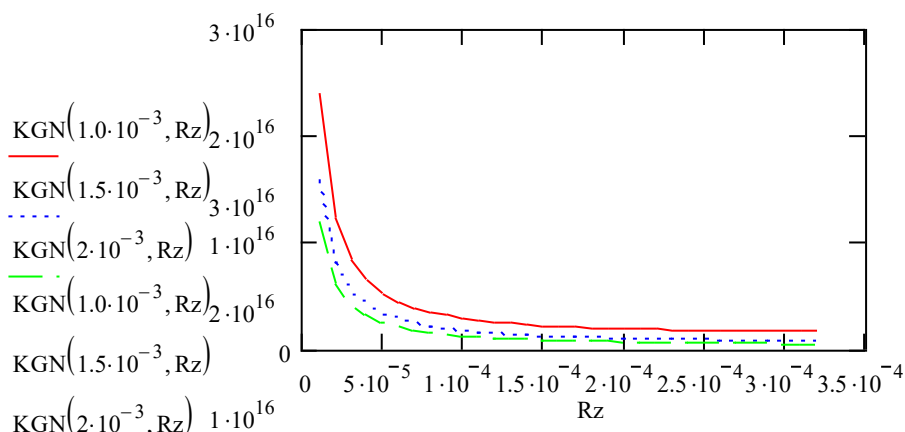


Рис. 3. Зависимость нормальной контактной жесткости между микровыступами от параметра шероховатости Rz при различных значениях радиуса сферического микровыступа: (—) — $a = 1,0$ мм; (····) — $a = 1,5$ мм; (----) — $a = 2,0$ мм, $f = 1$ МГц

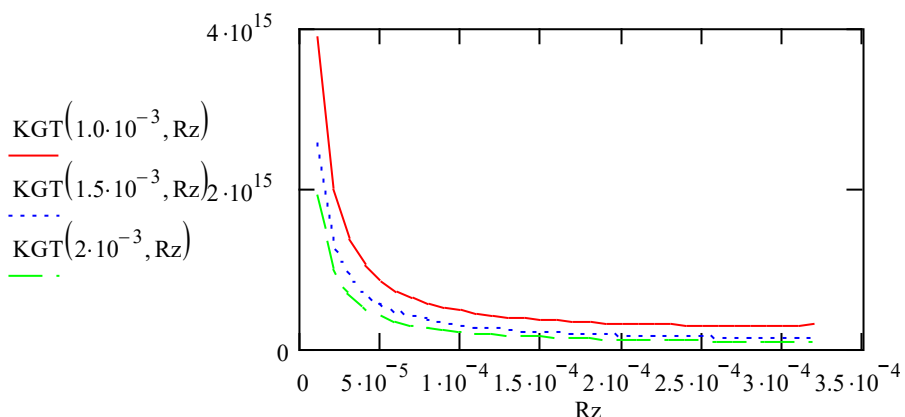


Рис. 4. Зависимость тангенциальной контактной жесткости между микровыступами от параметра Rz при различных значениях радиуса сферического микровыступа: (—) — $a = 1,0$ мм; (····) — $a = 1,5$ мм; (----) — $a = 2,0$ мм, $f = 1$ МГц

Искомые выражения для коэффициентов отражения и прохождения по колебательной скорости в случае нормального падения плоской продольной волны примут вид:

$$RL = \frac{\frac{-i2\pi f \rho_1 c_{l1}}{KGN}}{2 - \frac{i2\pi f \rho_1 c_{l1}}{KGN}}, \quad DL = \frac{2}{2 - \frac{i2\pi f \rho_1 c_{l1}}{KGN}} \quad (8)$$

В качестве примера на рис. 5(а, б) представлены зависимости модулей коэффициента отражения RML - (а) и коэффициента прохождения DML - (б) от

параметров: радиуса сферического микровыступа - a_k и величины шероховатости Rz_n . Учитывались изменения радиуса $a_k = 2 \cdot 10^{-3} + k \cdot 0,03 \cdot 10^{-3}$ м; при $k = 0 \dots 49$, и параметра шероховатости $Rz_n = 200 \cdot 10^{-6} + n \cdot 4 \cdot 10^{-6}$ м; при $n = 0 \dots 32$:

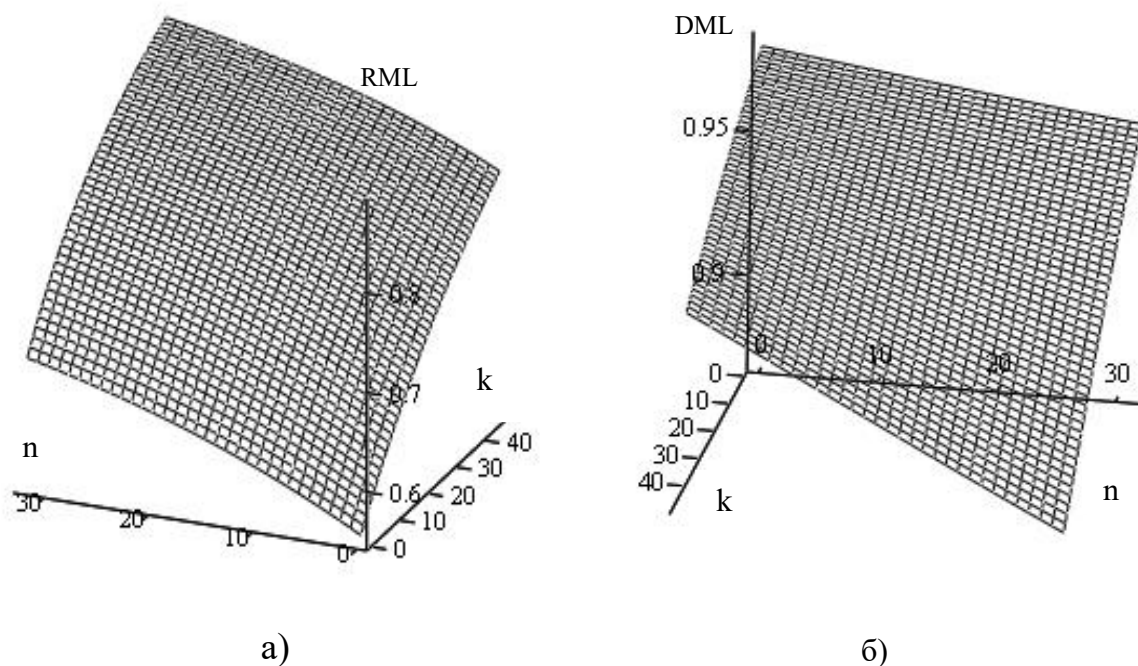


Рис. 5. Зависимости модулей коэффициента отражения – (а) и коэффициента прохождения - (б) по смещению для продольной волны от радиуса сферического микровыступа и параметра шероховатости, $f = 1$ МГц

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Алешин, Н. П. Ультразвуковой контроль: учеб. пособие / под общ. ред. В.В. Ключева / Н. П. Алешин, В. Т. Бобров, Ю. В. Ланге, В. Г. Щербинский/ – Москва : Изд. Дом «Спектр, 2011. – 224 с.
2. Аббакумов, К. Е. Волновые задачи акустических методов неразрушающего контроля / К. Е. Аббакумов, В. М. Цаплев. – СПб.: Изд-во : СПбГЭТУ "ЛЭТИ", 2015. – 336с.
3. Аббакумов, К. Е. Акустические характеристики графитовых включений в листах из медного сплава, полученного по технологии двойного вакуумного переплава / К. Е. Аббакумов., А. В. Вагин, И. Г. Сидоренко // Сб. статей 8-й Междунар. научно-технич. конф. «Современные методы и приборы контроля качества и диагностики состояния объектов», Могилев, 29-30 сентября 2022 г. – Могилев : Изд-во Белорус.-Рос. ун-та, 2022. – С.11-16.
4. Справочник по триботехнике : в 3 т. / Под общей ред. Хебды М. . – Москва : Машиностроение, 1989. – Т.1.: Теоретические основы. – С. 56-58.
5. Аббакумов, К. Е. Рассеяние плоских упругих волн на микрошероховатой границе раздела твердых сред / К. Е. Аббакумов // Дефектоскопия. – 2017, №7. – С. 3-13.
6. Abbakumov, K. E. Dispersion Equation for Longitudinal Waves in a Layered Medium with Inhomogeneous Boundary Conditions in Different Propagation Directions / K. E. Abbakumov , A.V. Vagin // Rus. Journal of Nondestr. Testing. – 2020. – Vol. 56, № 1. – P.20–27.

Контакты:

keabbakumov@etu.ru (Аббакумов Константин Евгеньевич);
avvagin@etu.ru (Вагин Антон Владимирович);
igsidorenko@etu.ru (Сидоренко Ирина Геннадьевна).