

## КОМПЬЮТЕРНОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ КАК МЕТОД АНАЛИЗА АСМ-ИЗОБРАЖЕНИЙ КОНТАКТНЫХ ПОВЕРХНОСТЕЙ

Гайдук Н. Б.

Институт механики металлополимерных систем им. В. А. Белого НАНБ, ул. Кирова 32А, 246050 г. Гомель, Беларусь.

Актуальность исследования прецизионного контакта связана с современными тенденциями миниатюризации подвижных сопряжений в точной механике, вычислительной технике, оптике, электронике, медицинской технике и др. Разработка прецизионных узлов трения требует развития новых экспериментальных методов оценки параметров топографии гладких поверхностей, создания моделей их контакта и методик оценки работоспособности при фрикционном взаимодействии. В анализе прецизионных сопряжений один из важнейших факторов – микронеоднородность структуры материалов, которая обуславливает неравномерность распределения физико-механических свойств в поверхностных слоях.

В настоящее время наиболее эффективным способом получения всех необходимых данных для расчета прецизионного контакта является сканирующая зондовая микроскопия. Сочетание различных режимов сканирования и силовой спектроскопии позволяет получить количественную информацию о топографии, адгезионной активности поверхности и микромеханических свойствах поверхностных слоев материалов.

Одна из наиболее важных проблем – это проблема прогнозирования сил контактного взаимодействия. Моделирование является одним из приоритетных направлений решения этой проблемы. Вследствие сложности происходящих физико-химических и механических явлений в зоне контакта и взаимовлияния действующих при этом факторов обоснованное последовательное упрощение процесса трения позволяет выявить важные трибологические закономерности и роль основных параметров. Процесс формирования контакта на микроуровне во многом определяется его дискретностью, обусловленной шероховатостью поверхности, и носит вероятностный характер. Поэтому точное аналитическое описание такого контакта даже только с позиций механики проблематично. Наиболее эффективный путь преодоления данных трудностей – создание численных моделей. Численное моделирование занимает в трибологических исследованиях все более значительное место. Если результаты численного моделирования объекта достоверно отражают его поведение, то путем варьирования входными параметрами модели можно воспроизводить с помощью ЭВМ особенности такого поведения в самых разных, в том числе экстремальных, условиях. Моделирование контакта шероховатых поверхностей осуществляется с помощью различных методов более 3 десятилетий. На схеме, приведенной на рис. 1, сделана попытка классифицировать существующие методы. Одна из особенностей развития механики трения связана с активным использованием методов теории вероятностей для расчета контактного взаимодействия шероховатых поверхностей. Современный вероятностный подход к изучению контактного взаимодействия шероховатых поверхностей начался с известной статьи Дж.А. Гринвуда и Дж.В. Вильямсона [2], где последовательно и систематически реализована мысль о статистическом характере реального контакта и которая стала исходной позицией для многочисленных работ в данном направлении.

В отличие от методов, учитывающих влияние шероховатости при контактировании твердых тел с позиции традиционных методов теории упругости, в которых шероховатость заменяется некоторым сплошным слоем со специфическими свойствами (метод усредненного слоя), модели локального описания контакта дают более адекватную картину зоны сопряжения. Основанные на локальном подходе, модели трения достаточно гибки и более открыты для учета не только механических, но и ряда физических, физико-химических и других аспектов фрикционного взаимодействия.

Б. Бхушаном разработана компьютерная модель контакта 3-D изображений рельефа шероховатых поверхностей как цифровой метод для анализа упругих и упруго-пластичных контактов двух шероховатых поверхностей [4]. Метод основан на вариационном принципе, который предполагает,

что реальная площадь контакта и распределение контактных напряжений должны обеспечивать минимизацию полной потенциальной энергии.



Рис. 1. Классификация методов моделирования шероховатого контакта

С.К. Ли и Н. Реном в 1992 г. был разработан цифровой метод для моделирования контактов между поверхностями с продольной шероховатостью [1]. Для моделирования они использовали метод движущейся сетки, который требует больших объемов компьютерной памяти. В расчетах используется матрица деформаций, которая является функцией геометрии сетки. Метод движущейся сетки устраняет избыточность матрицы деформаций, уменьшая при этом ее размерность от  $O(N^2)$  до  $O(N)$ , где  $N$  – количество узлов сетки, а также уменьшает время ее создания.

М.-Х. Йу и др. использовали в 1995 г. метод конечных элементов для решения упруго-пластической задачи контакта при качении, которую они с помощью простой процедуры делили на 3 задачи упругости, получая эквивалентный результат [7].

Обычно при расчете характеристик контактного взаимодействия шероховатых поверхностей используют ряд допущений о форме и расположении выступов топографии, снижающих адекватность описания реальных поверхностей. Нами сделана попытка осуществить компьютерное моделирование процесса формирования адгезионного контакта участка поверхности с идеально гладкой плоскостью на основе данных измерения топографии методами СТМ и АСМ [6], т.е. не вводя дополнительных идеализирующих предположений о геометрии рассматриваемой поверхности.

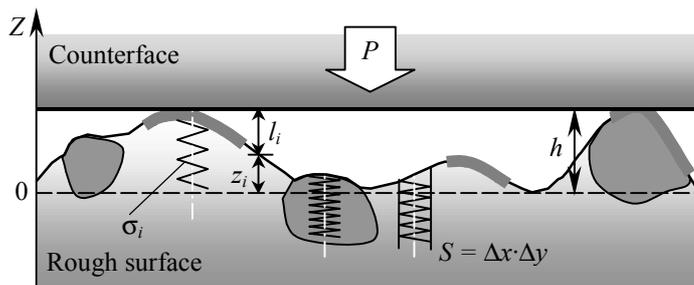


Рис. 2. Схема моделирования

Модель рассматривает силовое взаимодействие участка упругой поверхности с высотой рельефа  $z_j = Z(x_j, y_j)$ , измеренной в узлах сканирующей сетки, и идеально гладкой жесткой плоскости. Сила сопротивления деформированию элементарного столбика материала в точке  $j$  представлена функцией сближения  $\sigma_j$  (модель Винклеровского слоя):

$$P_j = \sigma_j^* \Delta x \Delta y \delta_j.$$

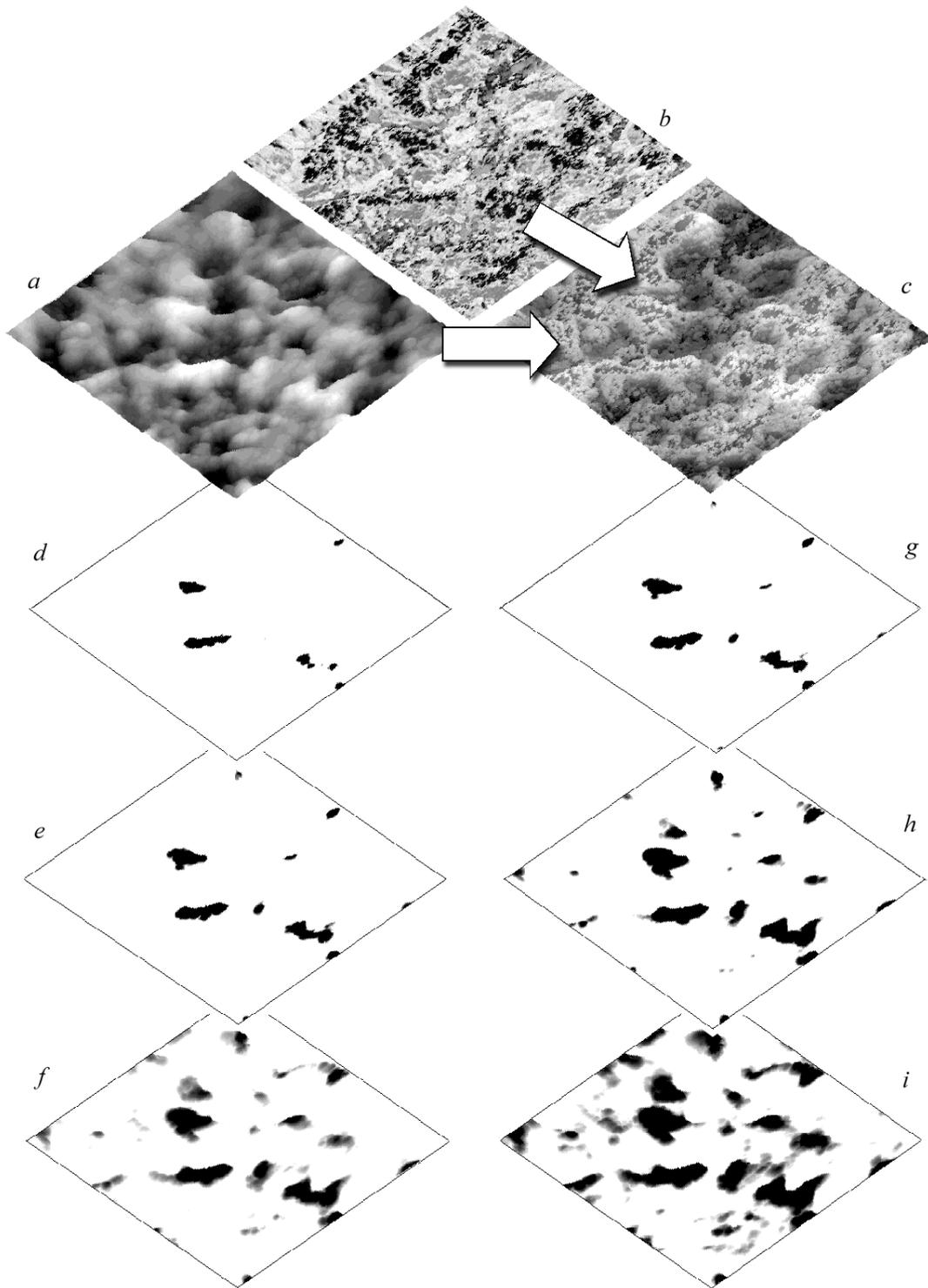


Рис. 3. Компьютерное моделирование контакта для TiN – покрытия (*a*) без (*d,e,f*) и с (*g,h,i*) учетом микрогеометрической и микромеханической неоднородности поверхности. *a*- изображение топографии; *b*- изображение фазового контраста; *c*- изображение, полученное наложением изображений *a* и *b*; *d,g*- распределение контактных напряжений при нагрузке 246 МПа; *e, h*- при нагрузке 645 МПа; *f, i*- при нагрузке 5570 МПа.

Молекулярное взаимодействие поверхностей характеризуется потенциалом Леннарда–Джонса. Форма деформированной поверхности определяется сжатием материала  $dz_j$  в области контакта и внеконтактным растяжением за его пределами. Направление результирующей силы, действующей на элементарный участок изображения площадью  $\Delta x \Delta y$ , было определено из условия равновесия сил. Это позволило визуальным образом отобразить фактическую площадь контакта  $A_r$ . Для деформированной поверхности  $z'_j = z_j + dz_j$  после суммирования по всем соответствующим точкам изображения определяется номинальное контактное напряжение  $p$  и внеконтактная адгезионная сила  $F_s$ , соответствующие уровню деформации  $h$

$$p(h) = -\Delta x \Delta y \sum_j \sigma_j^*(h - z'_j);$$

$$F_s(h) = \frac{8}{3} \varepsilon^2 \Delta x \Delta y \sum_j \Delta \gamma_j (h - z'_j)^3,$$

где  $\varepsilon$  – межатомное расстояние для исследуемого материала;  $\Delta \gamma$  – удельная поверхностная энергия. Равнодействующая между контактными и внеконтактными силами для рассматриваемого участка поверхности не равна нулю и в зависимости от знака соответствует либо внешней сжимающей силе либо силе адгезии при разделении поверхностей.

На рис. 3 представлены исходные изображения топографии (а), фазового контраста (b) поверхности трения TiN- покрытия, размером 18×18 мкм, изображение, полученное наложением изображений топографии и фазы (с), а также изображения, визуализирующие распределения контактных напряжений при различных нагрузках (d–i), рассчитанные с помощью компьютерной модели без и с учетом микрогеометрической и микромеханической неоднородности поверхности.

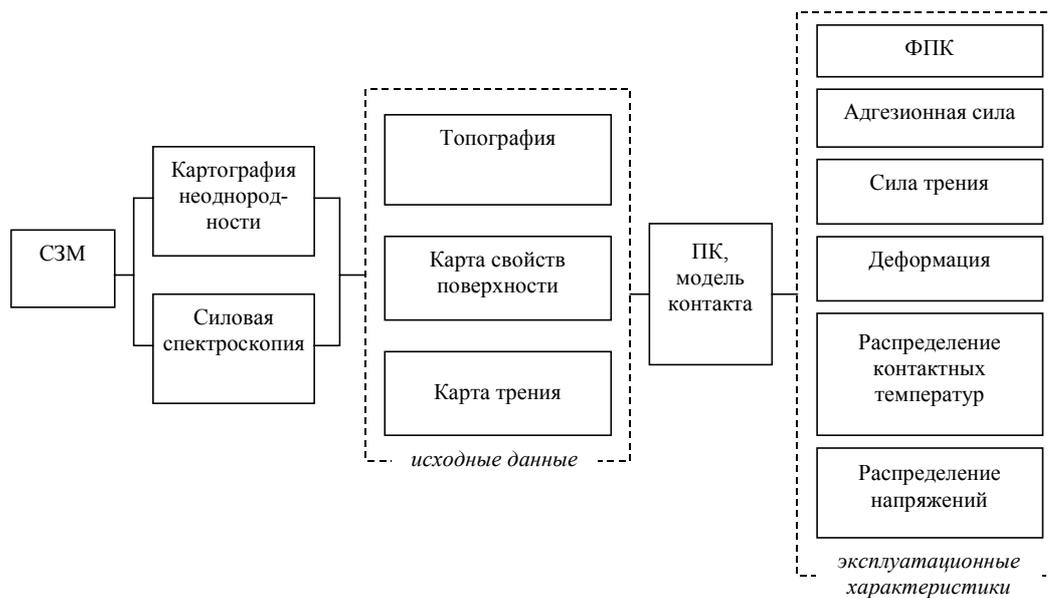


Рис. 4. Схема преобразования информации при моделировании контакта на основе СЗМ-данных

3-D компьютерное моделирование возможно с использованием серии СЗМ-изображений, описывающих топографию и микромеханическую неоднородность исследуемых поверхностей. Дополнительные процедуры наноиндентирования и силовой спектроскопии используются для повышения объективности подготовки начальных данных для расчетов. Таким образом, путем анализа рабочих поверхностей с помощью специальных методик СЗМ и компьютерного моделирования на стадии проектирования могут быть получены эксплуатационные характеристики прецизионных сопряжений и оптимизированы поверхности для уменьшения коэффициента трения, сил слипания поверхностей и минимизации износа (рис. 4).

## Литература

1. Ren N., Lee Si C. The effect of surface roughness and topography on the contact behavior of elastic bodies, *Journal of Tribology*, 1994, Vol. 116, pp. 804-809.
2. Greenwood J.A., Williamson J.B.P. Contact of nominally flat surfaces, *Proc.Roy.Soc.*, A295, P. 300-319.
3. Johnson K.L., Kendall K., Roberts A.D. Surface energy and the contact of elastic solids, *Proc. Roy. Soc.*, A324, pp. 301-313.
4. Tian X., Bhushan B. A numerical three-dimensional model for the contact of rough surfaces by variational principle, *ASME J. Tribology*, 1996, Vol. 118, pp. 33-42.
5. Chizhik S. A., Gorbunov V. V., Myshkin, N. K., 1995, "Analysis of molecular scale roughness effect on contact of solids based on computer modelling, *Precision Eng.*, Vol. 17, pp. 186-191.
6. Чижик С.А., Горбунов В.В., Мышкин Н.К. Компьютерное моделирование зоны контакта твердых тел на основе данных сканирующей зондовой микроскопии, *Трение и износ*, 1993, том 14, №4, с. 634-644.
7. Yu M. M.-H., Moran B., Keer L. M. A direct analysis of three-dimensional elastic-plastic rolling contact, *Trans. ASME*, 1995, Vol. 117, pp. 234-243.