

УДК 539.37

О СООТНОШЕНИИ УПРУГОЙ И ПЛАСТИЧЕСКОЙ ДЕФОРМАЦИЙ КОНТАКТА ТЕХНИЧЕСКИХ ПОВЕРХНОСТЕЙ И КРИТЕРИЯХ ЭТОГО СООТНОШЕНИЯ

В.В. Измайлов, М.В. Новоселова

Надежность самых различных по конструкции и назначению технических систем зависит в значительной мере от характеристик контактных соединений, присутствующих в каждом более или менее сложном техническом устройстве. Деформационно-прочностные характеристики контакта деталей машин не менее важны с точки зрения обеспечения надежности, чем аналогичные объемные характеристики деталей. При этом описание деформационных процессов в контактных соединениях – более сложная математическая и физическая задача, чем описание аналогичных процессов в объеме материала конструкций. Это связано с влиянием на процессы деформации не только физико-механических свойств материалов деталей, но и микрогеометрией контактирующих поверхностей, которое в случае объемной деформации отсутствует в принципе.

Так же, как в механике деформируемого твердого тела, в механике и физике дискретного контакта деталей машин важным является вопрос о механизме деформации материала под действием приложенного напряжения – упругом или пластическом, точнее, упругопластическом. Если с точки зрения механики деформируемого твердого тела пластические деформации чаще всего являются нежелательными, то в контактных соединениях нередко пластический контакт вполне допустим и даже предпочтителен. В качестве примера можно привести электрические контактные соединения, в которых пластическая деформация неровностей шероховатой поверхности приводит к разрушению непроводящих поверхностных пленок и обеспечивает металлический контакт, соответственно, уменьшая контактное электросопротивление.

Целью данной работы являлось проанализировать соотношение упругой и пластической составляющих деформации дискретного контакта шероховатых технических поверхностей, а также обсудить критерии, на основании которых можно оценить вклад каждой из упомянутых составляющих общей деформации.

Контакт единичных неровностей. В механике и физике дискретного контакта общепринятым является моделирование единичных неровностей поверхности телами правильной геометрической формы: сферическими или эллипсоидальными сегментами, конусами, пирамидами, клиньями. Это связано с тем, что аналитические решения, связывающие внешнее воздействие на контакт в виде сил или напряжений, действующих на контактирующие неровности и их деформационный отклик, получены для тел правильной геометрической формы. Наиболее распространена сферическая модель неровностей, при этом высота сферических сегментов, моделирующих единичные неровности, считается случайной величиной, подчиняющейся определенному закону распределения. Что касается радиусов закругления вершин неровностей, то в некоторых моделях они рассматриваются как случайные величины, имеющие соответствующее распределение, а в некоторых моделях радиус закругления вершин неровностей считается постоянным, равным среднему значению.

Описанию деформации контакта двух твердых тел сферической формы или контакта шар – плоскость уделяется неослабевающее внимание уже много лет [1–6]. Это

связано с применением полученных решений к определению твердости материалов, а в последнее время – и к определению других механических свойств по диаграмме вдавливания [7]. В этом случае не обойти вопрос о критериях перехода от упругой деформации к пластической и о соотношении упругой и пластической составляющих деформации контакта.

Как и в механике деформируемого твердого тела, эти критерии строятся на основе определенной теории критического состояния материала в наиболее опасной точке. Чаще всего используются условия пластичности Треска–Сен-Венана и Мизеса.

Используя значения максимальных касательных напряжений, полученные из решения Г.Герца для контакта тел с поверхностью второго порядка кривизны с первоначальным касанием в точке, и одно из условий пластичности, различные авторы получали критериальные соотношения, характеризующие переход от упругих деформаций в контакте с пластическим в виде

$$N_{кр} = K \frac{\sigma_s^3 R^2}{E^{*2}}, \quad (1)$$

где $N_{кр}$ – критическое значение нагрузки на контакт, соответствующее переходу к пластической деформации; σ_s – предел текучести материала; R – радиус шарового индентора; E^* – эквивалентный модуль упругости материалов контактирующих тел:

$$\frac{1}{E^*} = \frac{1-\mu_1^2}{E_1} + \frac{1-\mu_2^2}{E_2}, \quad \mu - \text{коэффициент Пуассона. Значения коэффициента } K \text{ по данным}$$

различных авторов приведены в табл. 1.

Как видно из табл. 1, значения коэффициента K и, соответственно, величины критической нагрузки по формуле (1) делятся на две группы, различающиеся по значениям K на порядок. Это объясняется тем, что различные авторы вкладывают различный смысл в понятие критической нагрузки. Первая группа значений $K = 14 \div 23$ соответствует зарождению пластической деформации в точке на глубине $z \approx 0,5a$ (a – радиус площадки контакта). Вторая группа значений $K = 280 \div 472$ соответствует распространению пластической деформации на поверхность отпечатка.

Как показывают расчеты с помощью метода конечных элементов (МКЭ) [11], значение критической нагрузки $N_{кр} = 383 \frac{\sigma_s^3 R^2}{E^{*2}}$ соответствует выходу области

пластической деформации материала на поверхность площадки контакта по ее периметру. Эпюра контактных давлений при этом выравнивается, приближаясь от параболического распределения давления, характерного для упругого контакта, к равномерному, характерному для идеально-пластического контакта.

Следует отметить, что при зарождении пластической деформации на глубине под поверхностью площадки контакта материал вокруг пластической зоны остается в упругом состоянии и зависимость деформации контакта от нагрузки хорошо описывается теорией Герца для упругого контакта. На рис. 1 показаны зависимости относительной деформации контакта шарового индентора из высокотвердой (*HRC* 62) хромистой стали с плоской поверхностью стального и медного образцов от относительной нагрузки на индентор. Критическая нагрузка $N_{кр}$ соответствует зарождению деформации в точке на глубине $z \approx 0,5a$ ($K = 23$ в формуле (1)), критическое сближение $\delta_{кр}$ – соответствующая величина внедрения индентора, рассчитанная по формуле Герца для упругого контакта (см., напр. [10]). Как видно (рис. 1), расхождения теории и эксперимента начинаются при значениях нагрузки на контакт, примерно на порядок больше критического значения,

Таблица 1

Значения коэффициента K
по данным различных авторов

K	14	22	23	30	280	383	472
Источник	[5]	[8]	[9]	[10]	[4]	[9]	[6]

соответствующего зарождению пластической деформации на глубине под поверхностью контакта.

Основываясь на результатах теоретического, экспериментального и численного (МКЭ) анализа, в дальнейшем принимаем за критерий перехода к пластическому контакту единичной неровности со сферической формой вершины величину нагрузки на неровность по формуле (1) при $K = 383$.

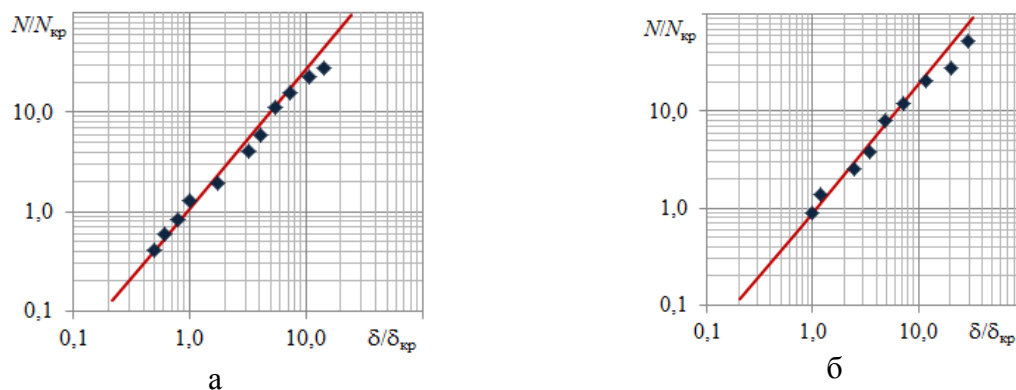


Рис. 1. Зависимость относительной деформации контакта шар – плоскость от относительной нагрузки: а – плоский образец из стали 35, $HB = 2\ 300$ МПа; б – плоский образец из меди М1, $HB = 870$ МПа

Множественный контакт. Критерий, описывающий соотношение упругой и пластической деформаций множественного контакта, образованного контактированием ансамбля микронеровностей, очевидно, должен включать в себя как физико-механические характеристики материалов контактирующих деталей, так и характеристики микрогеометрии контактирующих поверхностей. Под характеристиками микрогеометрии подразумеваются параметры, характеризующие, во-первых, форму единичных неровностей (например, радиус закругления их вершин), во-вторых, распределение неровностей по высоте. От формы неровностей зависит величина критической нагрузки, при которой происходит смена механизма деформации (см. формулу (1)). От распределения неровностей по высоте зависит величина деформации данной неровности, следовательно, нагрузка на нее, связанная с деформацией в упругой области прямой зависимостью по закону Гука. Соотношение этих двух величин – фактической и критической нагрузок – определяет, деформируется данная неровность упруго или пластически.

Одним из критериев, характеризующих деформацию множественного контакта, является предложенный авторами работы [10] так называемый индекс пластичности

$$\Psi_{GW} = \frac{E^*}{H} \sqrt{\frac{Rq}{r_{cp}}}, \quad (2)$$

где Rq – среднее квадратическое отклонение профиля шероховатой поверхности; r_{cp} – средний радиус закругления вершин неровностей; H – твердость (микротвердость) материала контактирующих деталей (меньшая из двух величин). При $\Psi > 1$ контакт считается пластическим при любых реальных нагрузках на контакт, при $\Psi < 0,6$ – упругим.

В работе [12] предложен сходный по форме, но отличающийся граничными значениями критерий

$$\Psi = \frac{E^*}{H} \sqrt{\frac{Rp}{r_{cp}}}, \quad (3)$$

где Rp – наибольшая высота неровностей профиля над средней линией. Контакт считается упругим при $\Psi < 2$ и пластическим при $\Psi > 60$.

Между высотными параметрами шероховатости имеется теоретически и экспериментально установленная связь: $Rp \approx 3Ra$; $Rq \approx 1,25Ra$, где Ra – среднее арифметическое отклонение профиля шероховатой поверхности. Поэтому формулы (2) и (3) можно привести к единому виду

$$\Psi = \frac{E^*}{H} \sqrt{\frac{Ra}{r_{cp}}}. \quad (4)$$

Граничными значениями критерия будут: упругий контакт – $\Psi < 0,54$ согласно [10] и $\Psi < 1,2$ [12]; пластический контакт – $\Psi > 0,9$ [10] и $\Psi > 35$ [12].

Следует обратить внимание, что в формулах (2)–(4) используются средние значения высотных параметров неровностей и радиусов закругления их вершин, без уточнения вида функции распределения этих случайных величин. Погрешности, вносимые такого рода упрощением, неочевидны.

Кроме того, говоря о критических значениях параметра Ψ , необходимо четко определить понятия «упругий» и «пластический» контакт применительно к множественному контакту ансамбля неровностей шероховатой поверхности. Авторы работы [11] считают, что границей упругого контакта является определенная доля фактической площади контакта, приходящаяся на пластически деформированные выступы, конкретно эта доля составляет, по мнению авторов, 2%. В данной работе, как и в [12], границы упругого и пластического контактов определяются долей соответственно упруго и пластически деформированных неровностей шероховатости в общем числе контактирующих неровностей, конкретно эта доля принимается равной 5%.

Для анализа достоверности предложенных критериев и для оценки влияния функций распределения случайных величин – высот и радиусов вершин неровностей – воспользуемся компьютерной моделью дискретного контакта шероховатых тел [13]. Модель позволяет, в числе прочих характеристик контакта, рассчитать общее число контактирующих выступов и число пластически деформированных выступов. Критерием пластического контакта единичного выступа является величина критической нагрузки по формуле (1) при $K = 383$. В качестве функции распределения высот и радиусов вершин выступов принято бета-распределение [14] с параметрами формы $\alpha = \beta = 1,1$ и $\alpha = \beta = 3$. В первом случае распределение близко к равномерному (прямоугольному), во втором – к нормальному. Первый случай характеризуется большим разбросом значений случайной величины, во втором случае рассеяние значений меньше (коэффициент вариации 0,56 и 0,38 соответственно).

Характеристики модельных поверхностей приведены в табл. 2. Результаты моделирования представлены на рис. 2 в виде зависимости доли пластически деформированных неровностей $\xi_{пл} = n_{пл}/n_r$ от номинального давления и параметров формы бета-распределения высот и радиусов вершин неровностей ($n_{пл}$ – число пластически деформированных неровностей; n_r – общее число контактирующих неровностей). Критерием для отнесения неровности к пластически или упруго деформированной является величина нагрузки N_i , приходящейся на данную неровность: при $N_i \leq N_{кр}$ контакт данной неровности относится к упругим, при $N_i > N_{кр}$ – к пластическим. Величина критической нагрузки определяется по формуле (1) при $K = 383$.

Таблица 2

Свойства контактирующих поверхностей

№ п/п	Материал, обработка	E , ГПа	H , ГПа	Ra , мкм	r , мкм	Ψ
1	Сталь, полирование	200	7	0,08	2 000	0,1
2	Сталь, шлифование	200	6,5	0,63	1 000	0,5
3	Бронза, шлифование	100	1,4	0,63	1 000	1,0

4	Медь, шлифование	100	0,6	0,63	200	5,0
5	Бронза, точение	100	1,6	7	70	11
6	Алюминиевый сплав, точение	70	0,25	7	70	50

Интервал изменения номинального давления на рис. 2 охватывает практически весь диапазон типичных значений для подвижных (узлы трения) и неподвижных (резьбовые соединения и т. п.) контактных соединений.

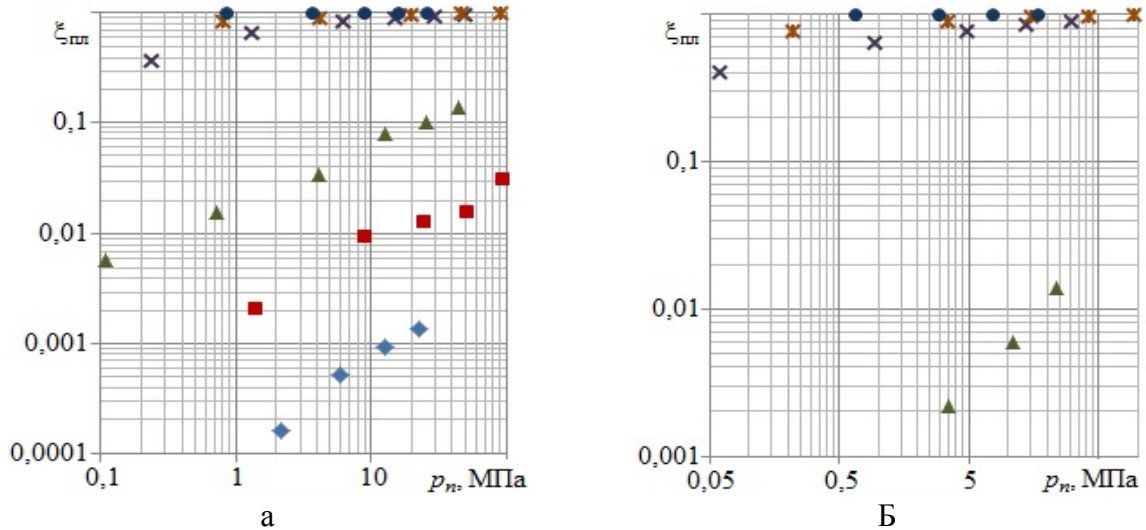


Рис. 2. Зависимость доли пластически деформированных выступов $\xi_{пл}$ от номинального давления p_n для модельных поверхностей: \blacklozenge – 1; \blacksquare – 2; \blacktriangle – 3; \times – 4; $*$ – 5; \bullet – 6. Параметры бета-распределения: а – $\alpha = \beta = 1,1$; б – $\alpha = \beta = 3$

Как видно из рис. 2, контакт поверхностей № 1 ($\Psi = 0,1$) и № 2 ($\Psi = 0,5$) с равномерно распределенными параметрами шероховатости ($\alpha = \beta = 1,1$) во всем диапазоне номинальных давлений можно считать упругим в соответствии с принятым условием $\xi_{пл} < 0,05$. При распределении параметров шероховатости, близком к нормальному, к упругим относится и контакт поверхностей № 3 ($\Psi = 1$). Контакт поверхностей № 6 ($\Psi = 50$) во всем диапазоне номинальных давлений пластический ($\xi_{пл} > 0,95$). Контакт остальных поверхностей упругопластический.

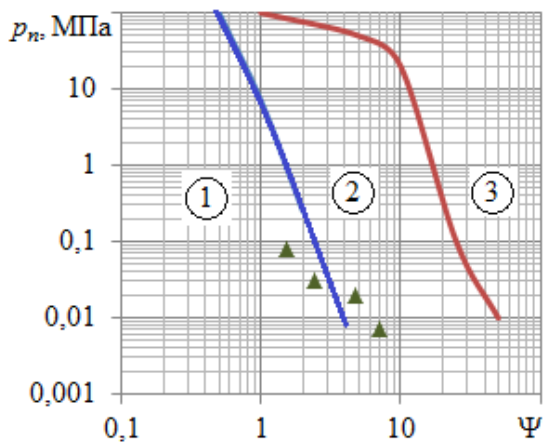


Рис. 3. Карта механизмов деформации дискретного контакта при равномерном распределении параметров шероховатости: 1 – область упругого контакта; 2 – упруго-

пластического; 3 – пластического.

Точки – эксперимент [15] можно построить своеобразную карту механизмов деформации дискретного контакта (рис. 3), на которой наглядно указаны области упругого, упругопластического и пластического контактов. Для сравнения на рис. 3 приведены экспериментально определенные значения номинального давления, соответствующие переходу от упругого контакта к упругопластическому для четырех шероховатых поверхностей с параметрами $Ra = 0,15; 0,31; 0,76$ и $1,26$ мкм [16]. Совпадение с теоретическими значениями вполне удовлетворительное. Как следует из рис. 3, практически при любых номинальных давлениях контакт можно считать упругим при условии $\Psi < 0,5$ и пластическим при условии $\Psi > 50$. В более узком диапазоне $0,1 < p_n < 10$ МПа условия преимущественно упругого и преимущественно пластического контакта $\Psi < 1$ и $\Psi > 25$ соответственно, что хорошо согласуется с приведенными выше теоретическими значениями.

Авторы надеются, что представленные результаты, уточняющие критерии перехода дискретного контакта шероховатых тел от упругих деформаций к пластическим, позволят точнее предсказывать и управлять эксплуатационными характеристиками разнообразных контактных соединений. Наиболее информативным подходом нам представляется построение карт механизмов деформации контакта для конкретных видов технологической обработки контактирующих поверхностей (см. рис. 3).

Библиографический список

1. Ишлинский, А.Ю. Осесимметричная задача теории пластичности и проба Бринелля / А.Ю. Ишлинский // П.М.М. 1944. Т. 8. Вып. 3. С. 201–224.
2. Зайцев, Г.П. Задача Герца и проба по Бринелю / Г.П. Зайцев // ЖТФ. 1949. Т. 19. Вып. 3. С. 336–344.
3. Ивлев, Д.Д. Вдавливание гладкого сферического штампа в жестко-пластическое полупространство / Д.Д. Ивлев, Р.И. Непершин // Механика твердого тела. 1973. № 4. С. 159–171.
4. Дрозд, М.С. Определение механических свойств металла без разрушения / М.С. Дрозд. М.: Металлургия, 1965. 171 с.
5. Джонсон, К.Л. Механика контактного взаимодействия / К.Л. Джонсон. М.: Мир, 1989. 510 с.
6. Матюнин, В.М. Критические нагрузки и параметры отпечатка в начальной стадии пластического контакта шара с плоской поверхностью металла / В.М. Матюнин // Заводская лаборатория. Диагностика материалов. 2007. Т. 73. № 4. С. 62–65.
7. Булычев, С.И. Испытание материалов непрерывным вдавливанием индентора / С.И. Булычев, В.П. Алехин. М.: Машиностроение, 1990. 224 с.
8. Hardy, C. Elastoplastic indentation of a half-space by a rigid sphere / C. Hardy, C.N. Baronet, G.V. Tordion // Int. J. Numerical Methods in Eng. 1971. V. 3. № 8. P. 451–462.
9. Измайлов, В.В. Контакт твердых тел и его проводимость: монография / В.В. Измайлов, М.В. Новоселова. Тверь: ТГТУ, 2010. 112 с.
10. Greenwood, J.A. Contact of nominally flat surfaces / J.A. Greenwood, J.B.P. Williamson // Proc. Roy. Soc. 1966. V. A295. № 1442. P. 300–319.
11. Васильев, М.В. Фрикционное взаимодействие тел с твердосмазочными покрытиями в упругопластической области: дис. ... канд. техн. наук / Васильев М.В. Тверь, 2013. 161 с.
12. Измайлов, В.В. Разработка теоретических основ методик расчетов фрикционных и электрических характеристик токопроводящих узлов трения: дис. ... докт. техн. наук / Измайлов В.В. М., 1995. 605 с.
13. Измайлов, В.В. Числовое и аналитическое моделирование дискретного контакта деталей машин / В.В. Измайлов, С.А. Чаплыгин // Интернет-журнал «НАУКОВЕДЕНИЕ» 2014. № 6. URL: <http://naukovedenie.ru/PDF/10TVN614.pdf>

14. Измайлов, В.В. Применение бета-распределения для расчета характеристик контакта шероховатых тел / В.В. Измайлов, М.С. Курова // Трение и износ. 1983. Т. IV. № 6. С. 983–990.

15. Halling, J. The elastic-plastic contact of rough surfaces and its relevance in the study of wear / J. Halling, R.D. Arnell, K.A. Nuri // Proc. Inst. Mech. Eng., Part C. Mechanical Engineering Science. 1988. V. 202. № 4. P. 269–274.