

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Мышкин Н. К. Трибология. Принципы и приложения / Н. К. Мышкин, М. И. Петроковец. – Гомель : ИМНС, НАНБ, 2002. – 310 с.
2. Богданович, П. Н. Трение и износ в машинах / П. Н. Богданович, В. Я. Прушак. – Минск: Высшая школа, 1999. – 374 с.
3. Машина для испытания материалов на трение и износ 2070 СМТ-1 / Техническое описание и инструкция по эксплуатации 2.779.013-01 ТО – М. : МЗИО, 1981. – 69 с.

УДК 620.178.7

ОСОБЕННОСТИ МОДЕЛИРОВАНИЯ ДИНАМИЧЕСКОГО КОНТАКТА ТВЕРДЫХ ЧАСТИЦ С ДЕТАЛЯМИ МАШИН

*Барсуков В. Г., Илькевич М. А.¹, Крупич Б.²,
Голуб В. М.³, Веремейчик А. И.³, Хвисевич В. М.³*

- 1) Гродненский государственный университет имени Янки Купалы,
г. Гродно, Республика Беларусь
- 2) Белостокский технологический университет,
г. Белосток, Польша
- 3) Брестский государственный технический университет;
г. Брест, Республика Беларусь

Введение

Динамический контакт твердых частиц с деталями машин и оборудования широко распространен в технике и реализуется, как правило, в виде двух принципиально различающихся схем, первая из которых охватывает фрикционный скользящий контакт, а вторая – ударное взаимодействие. Типичными представителями машин, в которых реализуется фрикционный скользящий контакт, являются нагнетающие вентиляторы систем пневмотранспорта, оборудование для подачи измельченного топлива, ускорители центробежно-ударных измельчителей, классификаторы, сепараторы, испытательное оборудование и другие устройства для транспортирования дисперсных материалов, основным рабочим органом которого является ротор с лопастями. Вторая группа динамического взаимодействия представлена в системах дробеструйной и пескоструйной обработки, а также в измельчителях ударного действия.

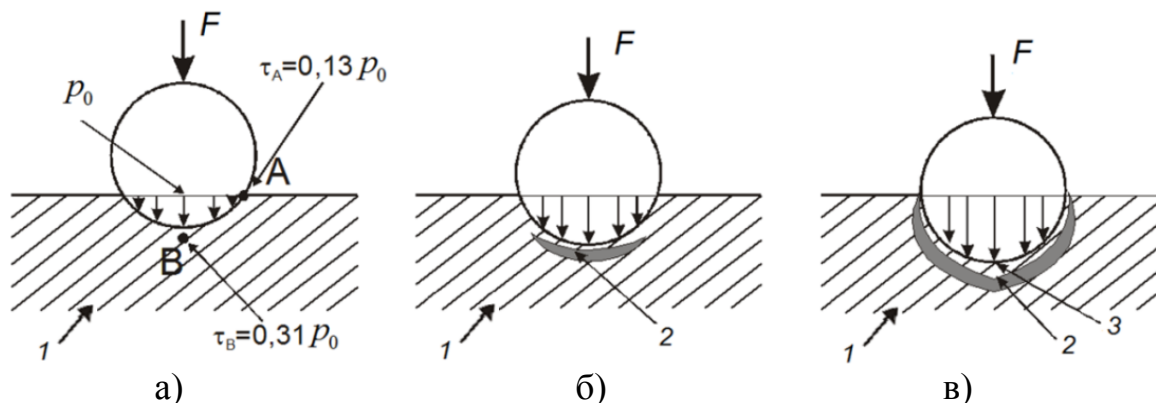
Несмотря на достигнутый прогресс в расчете и конструировании таких машин, многие вопросы изучены недостаточно. В частности, отсутствуют удобные для практики инженерные методики расчета параметров напряженного состояния, являющихся определяющими для анализа фрикционных потерь, а также изнашивания рабочих органов [1–3].

Цель работы – на основе анализа особенностей упруго-пластического динамического контакта выполнить сравнительный анализ методик математического моделирования и предложить удобную для практического использования методику расчетной оценки параметров такого контакта.

1 Механика процесса упруго-пластического деформирования

Рассмотрим механику процесса упруго-пластического деформирования при перпендикулярном контакте. Для анализа примем сферическую форму частиц.

Как было показано в работах [3, 4], процесс упруго-пластического контакта осуществляется в виде нескольких последовательно переходящих одна в другую стадий (рисунок 1).



*a – идеально упругая; б – стесненная упруго-пластическая;
в – свободная упруго-пластическая; 1 – упругая зона; 2 – пластическая зона;
3 – ядро (зона затрудненной деформации)*

Рисунок 1 – Стадии деформирования материала при контакте со сферической частицей

На начальной стадии (рисунок 1а) деформирование осуществляется упруго. Затем, при некоторой динамической нагрузке в приповерхностном слое ударяемого тела зарождается область пластического состояния, окруженная упруго-деформируемым материалом (рисунок 1б). При дальнейшем росте динамической нагрузки область пластического состояния выходит на поверхность деформируемой детали, после чего процесс характеризуется упруго-пластическим вдавливанием индентора (частицы) в деформируемую деталь. Наиболее подробно изучена первая стадия, которая подчиняется классическим решениям теории упругости [1, 2]. Промежуточная и заключительная стадии динамического упруго-пластического вдавливания изучены в меньшей мере. Применительно к заключительной стадии, но для схемы статического нагружения, М. Ю. Ишлинским был предложен подход, основанный на методах теории пластичности, согласно которому среднее давление в зоне контакта составляет [1, 2]

$$p_m = C\sigma_T, \quad (1)$$

где коэффициент C приблизительно равен 3 и зависит от формы индентора, а также трения на контактных поверхностях; σ_T – предел текучести материала. Однако такой подход не учитывает существование зоны упругой деформации под индентором и также является приближенным.

Имеется ряд исследовательских работ, посвященных численному анализу параметров напряженно-деформированного состояния, посвященных преимущественно квазистатическому индентированию материалов сферическим индентором. Предпринимаются также попытки аналитического решения соответствующей задачи. В частности, в работе [2] предложена упрощенная модель с шаровым ядром упруго-пластического внедрения (рисунок 2а). Согласно этой модели поверхность контакта охватывается полусферическим «ядром» радиуса r . Предполагается, что внутри ядра имеет место гидростатическое напряженное состояние интенсивностью, равной среднему контактному давлению p_m .

Анализ этой модели показал [1, 2], что для несжимаемого материала среднее давление определяется соотношением

$$\frac{p_m}{\sigma_T} \cong \frac{2}{3} \left(1,7 + \ln \frac{1}{3} \frac{rE_*}{R\sigma_T} \right). \quad (2)$$

Безразмерная переменная под знаком логарифма интерпретируется как отношение деформации, вызванной индентором (r/R) к упругой деформируемости материала (σ_T/E_*). На основе такого подхода построена зависимость (рисунок 2б) для зон упругого, стесненного упруго-пластического и свободного упруго-пластического деформирования. Из диаграммы видно, что заключительная стадия деформирования наступает при средних давлениях около $p_m \approx 2,7 \sigma_T$.

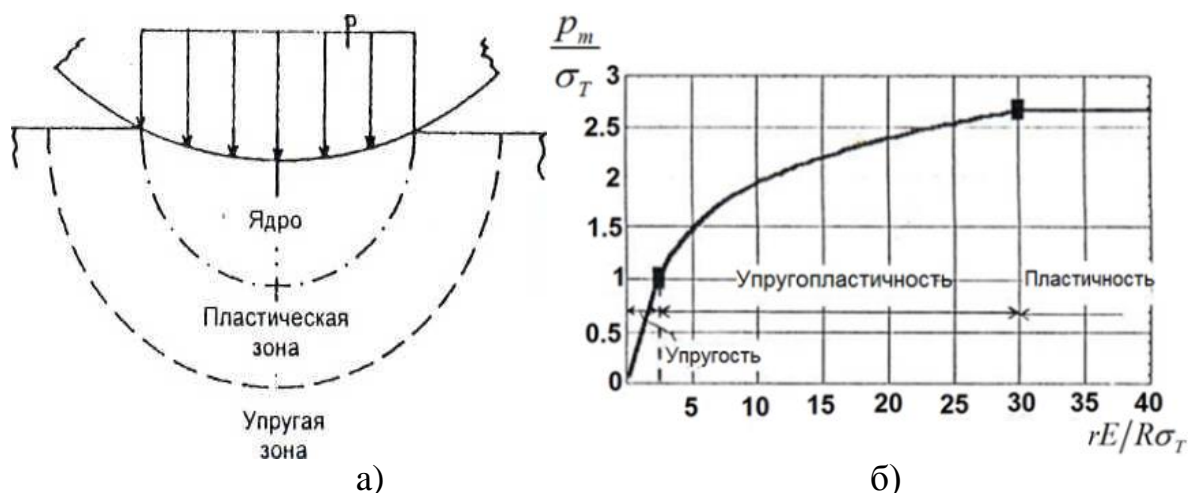


Рисунок 2 – Расчетная схема упруго-пластического деформирования с полусферическим «ядром» под индентором (а) и построенная на ее основе зависимость (б)

среднего контактного давления $\frac{p_m}{\sigma_T}$ от безразмерного радиуса контакта $\frac{rE_*}{R\sigma_T}$

2 Метод кусочно-линейных аппроксимаций

Вместе с тем, анализ показывает, что для технических расчетов возможна расчетная оценка параметров переходной зоны с использованием предположения о малости упруго-пластических деформаций и подчинении их закону Гука (метод кусочно-линейных аппроксимаций). Проанализируем напряженное состояние в зоне контакта с этих позиций.

На контуре пятна касания осевое напряжение равно нулю, а растягивающее радиальное σ_r и сжимающее тангенциальное σ_t равны между собой и могут быть определены по формуле [1, 2]

$$\sigma_r = -\sigma_t = \frac{1-2\nu}{3} p_0. \quad (3)$$

Условию начала свободного упруго-пластического вдавливания частицы соответствуют эквивалентные напряжения σ_{redA} в точке А (рисунок 1), равные пределу текучести σ_T детали лопасти. В соответствии с энергетической теорией Мизеса-Хубера Генки:

$$\sigma_{redA} = \sqrt{3} \cdot \frac{1-2\nu}{3} p_0 = \sigma_T, \quad (4)$$

где p_0 – наибольшие напряжения в зоне контакта (напряжения Герца).

При этом

$$p_0 = \frac{1}{\pi} \sqrt[3]{\frac{6F}{\eta^2 R^2}}, \quad (5)$$

где F – динамическое усилие; R – радиус частицы; η – универсальная упругая постоянная:

$$\eta = \frac{1}{E_*} = \frac{1-\nu_1^2}{E_1} + \frac{1-\nu_2^2}{E_2}, \quad (6)$$

где ν_1, ν_2, E_1, E_2 – коэффициенты Пуассона и модули упругости контактирующих тел соответственно; E_* – эффективный модуль упругости.

Из (4) следует, что

$$p_0 = \frac{\sqrt{3}\sigma_T}{1-2\nu}. \quad (7)$$

Среднее давление p_m в зоне контакта, в соответствии с теорией Герца, равно 2/3 от максимального [2]:

$$p_m = \frac{2}{3} p_0 = \frac{2\sqrt{3}}{3(1-2\nu)} \sigma_T. \quad (8)$$

Как видно из формулы (8), среднее давление в зоне контакта, соответствующее переходу от стесненного упруго-пластического деформирования (вторая стадия) к свободному пластическому индентированию (третья стадия), зависит от коэффициента Пуассона деформируемого материала.

Относительное среднее давление p_{rel} :

$$p_{rel} = \frac{p_0}{\sigma_T} = \frac{2\sqrt{3}}{3(1-2\nu)}. \quad (9)$$

Применительно к динамическому (ударному) нагружению, значение скорости соударения V_{mi} , соответствующее началу пластического индентирования, как показано в [4],

$$V_{mi} = 67,02 \sqrt{\frac{\sigma_T^5}{E^4 \gamma}}, \quad (10)$$

где γ – плотность материала сферической частицы.

3 Результаты математического моделирования и их обсуждение

В качестве модельных материалов для оценочных расчетов параметров упруго-пластического статического контакта принята сталь ($E = 200$ ГПа; $\gamma = 7800$ кг/м³; $\nu_l = 0,3$; эффективный модуль упругости при контакте стали со сталью $E_* = 109,89$ ГПа). В качестве материала контактирующих со сферической частицей детали приняты углеродистые конструкционные стали по ГОСТ 1050-2013. Оценку характеристических скоростей ударного взаимодействия применительно к газоабразивному изнашиванию производили на примере контактного взаимодействия кварцевого песка со сталью. Для кварца модуль упругости и коэффициент Пуассона равны соответственно: $E_k = 73$ ГПа; $\nu_k = 0,2$. Эффективный модуль упругости для контакта кварца со сталью составляет $E_* = 56,49$ ГПа.

В таблице 1 приведены рассчитанные по формуле (9) значения относительного среднего давления p_{rel} для широкого диапазона изменения коэффициента Пуассона деформируемого материала, характерного для конструкционных углеродистых сталей.

Таблица 1 – Расчетные значения относительного среднего давления p_{rel} для широкого диапазона изменения коэффициента Пуассона деформируемого материала

Коэффициент Пуассона ν	0,28	0,29	0,30	0,31	0,32
Среднее относительное давление начала пластического течения p_{rel}	2,62	2,75	2,89	3,04	3,21

Сравнение данных таблицы 1 с результатами К. Джонсона ($p_{rel} \approx 2,7$) и Ишлинского ($p_{rel} \approx 3$) показывает удовлетворительное согласование, что свидетельствует о возможности применения метода кусочно-линейных аппроксимаций для расчетной оценки силовых параметров начала пластического течения. Вместе с тем эти значения характеризуют только начальную стадию этого процесса, не учитывают последующее деформационное упрочнение материала, неравномерно распределенное в объеме очага деформации. В связи с изложенным, для области развитого пластического течения целесообразно использовать другие данные, например, полученные из опытов на определение твердости материалов по Бринеллю и Майеру (таблица 2).

Таблица 2 – Показатели механических свойств и значения скорости начала пластического индентирования V_{ni} и разрушения V_{np} наклепанной поверхности конструкционных углеродистых сталей по ГОСТ 1050-2013 кварцевым песком

Марка стали	Предел текучести σ_t , МПа	Твердость по Бринеллю, HB , МПа	Твердость по Майеру, HM , МПа	HB/σ_t	V_{ni} , м/с	V_{np} , м/с
20	245	1599	1626	6,53	0,25	13,10
25	275	1672	1771	6,08	0,33	15,77
30	295	1751	1850	5,94	0,40	18,96
35	315	2031	1936	6,45	0,47	22,90
40	335	2131	2229	6,36	0,55	27,11
45	355	2246	2338	6,33	0,63	29,11
50	375	2366	2464	6,31	0,72	31,57
55	380	2498	2595	6,57	0,75	33,86
60	400	2498	2595	6,25	0,85	37,05

Математическая обработка полученных данных показала, что среднее значение отношения твердости по Бринеллю (МПа) к пределу текучести составляет $HB(\text{МПа})/\sigma_t = 6,33$, а среднее значение отношения твердости по Майеру (МПа) к пределу текучести составляет $HM(\text{МПа})/\sigma_t = 6,53$, что существенно выше характеристических расчетных значений начала пластического индентирования, приведенных в таблице 1.

Деформационное упрочнение многократно увеличивает также и критические значения скоростей соударения, необходимых для начала разрушения по-

верхности. В частности, результаты моделирования и расчетов, приведенные в работе [4] показывают, что предельная скорость контактной прочности, приводящая к интенсивному газо-абразивному изнашиванию, почти на два порядка превышает скорость, характерную для начала упруго-пластического деформирования поверхностного слоя.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Свириденко, А. И. Механика дискретного фрикционного контакта / А. И. Свириденко, С. А. Чижик, М. И. Петроковец. – Минск, Наука и техника, 1990. – 272 с.
2. Джонсон, К. Механика контактного взаимодействия / К. Джонсон. – М. : Мир, 1989. – 570 с.
3. Крупич, Б. Моделирование микроконтактных взаимодействий при скольжении твердых частиц вдоль радиальных лопастей турбомашин / Б. Крупич, В. Г. Барсуков, М. А. Илькевич // Трение и износ. – 2022. – Т. 43, № 2. – С. 141–149.
4. Крупич, Б. Моделирование микроконтактных взаимодействий при газоабразивном изнашивании сталей с учетом деформационного упрочнения / Б. Крупич, В. Г. Барсуков, А. И. Свириденко // Трение и износ. – 2019. – Т. 40, № 6. – С. 644–653.

УДК 620.98

ИССЛЕДОВАНИЯ ПНЕВМАТИЧЕСКОЙ СИСТЕМЫ ВАГОНА-ЛАБОРАТОРИИ

Борисова Ю. А., Иголкин А. А.

*Самарский национальный исследовательский университет
имени академика С. П. Королева, г. Самара, Российская Федерация*

В ходе работы была рассмотрена проблема энергосбережения и ее актуальность в настоящее время, были изучены методы сбережения сжатого воздуха и проведен литературный обзор, подобрано оборудование для системы, произведена модернизация системы, разработана модель поведения системы в программной среде AMESIM, проведен эксперимент и выполнен анализ результатов.

Сжатый воздух сегодня широко используется в промышленности. Несмотря на то, что она может работать адекватно, стоит более внимательно изучить систему для повышения операционной эффективности, поскольку потенциальная экономия может составить тысячи долларов эксплуатационных расходов и привести к значительному сокращению выбросов парниковых газов каждый год [1].

В программной среде AMESIM были созданы имитационные модели реальных пневматических систем, используемых на вагонах лабораториях. Проведение математических моделирований подразумевает дальнейшее использование предложенных способов для реальных систем в случае положительного результата.

В процессе исследования пневматической системы вагона были предложены методы по сбережению энергии сжатого воздуха, такие как уменьшение диамет-