

## Машиностроение и машиноведение

УДК 621.8

DOI: 10.30987/article\_5be14a244adca8.76566258

А.Г. Суслов

### РАЗВИТИЕ УЧЕНИЯ О КОНТАКТНОЙ ЖЕСТКОСТИ И ИНЖЕНЕРИИ ПОВЕРХНОСТИ ДЕТАЛЕЙ МАШИН

Рассмотрены этапы развития учения о контактной жесткости и инженерии поверхности деталей машин. Приведены описания процессов дискретного контактирования деталей машин. Пред-

ставлены параметры качества поверхностного слоя, применяемые в различные временные периоды.

**Ключевые слова:** контактная жесткость, качество поверхности, параметры шероховатости, безразмерные комплексы.

A.G. Suslov

### DEVELOPMENT OF DOCTRINE ON CONTACT STIFFNESS AND ENGINEERING OF MACHINERY SURFACE

The stages of the development of the doctrine on contact stiffness and machinery surface engineering have been analyzed. References are given to the papers of the Soviet and Russian scientists in the development of this doctrine. The descriptions of the processes of

machinery discrete contacting are shown. The quality parameters of a surface layer used in different time periods are presented.

**Key words:** contact rigidity, surface quality, roughness parameters, dimensionless complexes.

Советские ученые К.В. Вотинов и А.П. Соколовский, исследуя жесткость станков, установили, что она в 2-3 раза меньше теоретической жесткости деталей, входящих в станок. Они впервые объяснили это контактными деформациями в соединениях деталей станков и обозначили их контактной жесткостью [1].

Однако теоретические основы контактирования твердых тел начали рассматривать еще в конце XIX века. Впервые пространственная контактная задача деформации упругих тел была решена Г. Герцем. Разработанная им теория контактных деформаций рассматривает два случая: первый - когда первоначальный контакт осуществляется в точке, второй - когда вначале контакт осуществляется по линии. Задача решается в предположении, что контактирующие тела являются однородными и изотропными, в зоне контакта имеют место только упругие деформации, силы давления нормальны к поверхности касания и размеры площади контакта малы по сравнению с размерами контактирующих тел.

Однако работы Герца явились лишь первым шагом к изучению контакта упругих тел. Детальное исследование этого вопроса было осуществлено в последующих работах, особенно в работах Н.М. Беляева и А.Н. Динника, в которых исходя из общих уравнений теории упругости получены выражения для компонентов напряженного состояния в окрестностях зоны контакта для случаев круговой площадки контакта, площадки в виде полосы и эллиптической площадки контакта (наиболее общий случай). Дальнейшее развитие теории контактной деформации получила в работах И.Я. Штаермана, А.И. Лурье, Н.И. Мухелишвили, Л.А. Галина и др.

И.Я. Штаерман рассматривает наиболее общий случай контакта двух тел, первоначально соприкасающихся в точке. При этом он отказывается от допущения Г. Герца о малости площадки контакта и учитывает не только сближение тел в процессе деформации, но и их относительное вращение. В его работах решены некоторые задачи о влиянии характера поверхности соприкасающихся тел на распределение контактного давления.

А.И. Лурье решает ряд задач о деформировании упругого полупространства при вдавливании круглого, эллиптического плоского и неплюского штампов.

Н.И. Мухелишвили дает методы решения плоской задачи, рассматривая действие сосредоточенной силы, приложенной в точке неограниченной плоскости.

Подробно исследована проблема штампов в работе Л.А. Галина, которому удалось решить контактные задачи с учетом сил трения и при наличии анизотропии полуплоскости. На дискретный характер контактирования поверхностей было указано еще в XIX веке русским ученым А. Пальшау, рассматривающим контакт твердых тел.

В настоящее время положение о дискретности контакта является общепризнанным. Дискретность контакта обусловлена наличием на реальных поверхностях шероховатости, волнистости и макроотклонений.

А.И. Петрусевиц впервые учел влияние качества поверхности на контактные напряжения сжимаемых тел. Им были получены выражения для определения допустимых высот неровностей исходя из условия контактной прочности сопрягаемых поверхностей.

И.В. Крагельский [2] рассмотрел сближение двух шероховатых поверхностей, неровности которых смоделированы набором стержней. Ценность данной работы в том, что при расчете учтена вероятность встречи выступов сопряженных поверхностей.

Значительная работа по изучению контактной жесткости шероховатых поверхностей выполнена Э.В. Рыжовым [3]. Моделируя шероховатость поверхностей набором эллипсоидов, автор определил жесткость стыков для различных случаев их деформаций.

Н.Б. Демкин [4] также рассматривает упругопластический контакт шероховатых поверхностей. Он рассматривает упругую осадку выступов на основе сферической модели микронеровностей под действием нагрузки. Под влиянием этой нагрузки вы-

ступ, вследствие упругой деформации основы, опускается вниз.

Вопрос о влиянии волнистости на контактную жесткость впервые был рассмотрен А.П. Соколовским [1].

Для тех случаев, когда волнистость имеет форму регулярных сферических или цилиндрических выступов, И.В. Крагельский [2] предлагает вычислять контурную площадь по формулам Герца:

$$A_c = c_1 A_a^{1/3} (RP/l)^{2/3}; \quad (1)$$

$$A_c = c_2 (A_a RP/l)^{1/2}, \quad (2)$$

где зависимость (1) относится к сферической волнистости, зависимость (2) – к цилиндрической при контакте с плоскостью;  $R$  – радиус закругления волн;  $l$  – шаг волны;  $c_1, c_2$  – константы, зависящие от упругих свойств материалов.

Э.В. Рыжов показал, что контакт поверхностей, имеющих не только шероховатость, но и волнистость, в значительной степени отличается от контакта этих поверхностей без волнистости [3].

Н.Б. Демкин в работе [4] также получил выражение для сближения двух волнистых поверхностей. Однако указанные теоретические зависимости, основанные на использовании формул Герца для определения деформаций волн, дают погрешность, так как наличие шероховатости искажает фактическую эпюру давлений на контакте.

Влияние неплюскости на контактную жесткость было оценено в работах Д.Н. Решетова. При наличии существенных отклонений от плоскостности упругие сближения в плоском стыке при центральном нагружении предложено определять по формуле

$$\delta = c\sigma^m \mu,$$

где  $\mu$  – коэффициент, учитывающий влияние неплюскости. В зависимости от формы неплюскости были предложены формулы для определения коэффициента  $\mu$ , причем  $\mu$  принимает значения от 3 до 5.

Экспериментальным исследованием контактной жесткости реальных поверхностей занимались З.М. Левина и Д.Н. Решетов [5]. Они предложили эмпирическую зависимость для определения контактной жесткости соединений:

$$Y = C \cdot P^m,$$

где  $P$  – сила;  $C$  и  $m$  – коэффициенты, зависящие от методов обработки сопрягаемых поверхностей. Э.В. Рыжов экспериментально установил значения коэффициентов  $C$  и  $m$  при различных технологических методах обработки плоских поверхностей образцов [3].

Автором предложена новая физическая картина контактных деформаций [6]. Она базируется на том, что при первом приложении нагрузки контактирующие поверхности сближаются в результате пластических деформаций выступов шероховатости до тех пор, пока не сформируется фактическая площадь контакта, которая выдерживает приложенную нагрузку:

$$A_{\text{ф}} = P/H_{\mu},$$

где  $H_{\mu}$  – поверхностная микротвердость.

Сформировавшиеся фактические площадки контакта упруго оседают в нижележащие слои. Величина этих упругих деформаций рассчитывается по формулам Н.И. Мухелишвили. Контактная жесткость при динамических нагрузках рассмотрена в работе [7].

В последние годы теоретическими работами по контактными деформациям регулярных микронеровностей и нанонеровностей занимаются в лаборатории акад. РАН Горячевой И.Г. Института проблем механики РАН.

В 1970-е гг. экспериментальными исследованиями контактной жесткости занимались во многих научных школах. Но поскольку методики при этом были различными, то и их результаты при одних и тех же технологических методах обработки поверхности образцов отличались в несколько раз. Поэтому в 1982 г. автором разработана нормаль по измерению контактной жесткости [8].

В настоящее время для экспериментального исследования влияния техноло-

гических условий обработки на контактную жесткость плоских и цилиндрических поверхностей в Брянском государственном техническом университете разработана и изготовлена автоматизированная система научных исследований контактной жесткости, реализующая нормализованный метод ее измерения [9].

Таким образом, результаты приведенных выше работ показывают, что контактная жесткость соединений зависит от геометрических характеристик качества сопрягаемых поверхностей.

Первоначально качество поверхности трактовалось как чистота поверхности, которую оценивали в виде знаков  $\nabla$ ,  $\nabla\nabla$ ,  $\nabla\nabla\nabla$ ,  $\nabla\nabla\nabla\nabla$ , проставляемых на чертежах деталей, и технологически обеспечивали при их обработке.

В 1940-е гг. ученые, занимающиеся изучением качества поверхности, установили, что наряду с шероховатостью, трактуемой как чистота поверхности, имеются и другие неровности с большим шагом, трактуемые как волнистость, огранка, бочкообразность, конусность и т.д. В последующем для упрощения и незагромождения чертежей (в соответствии с ГОСТ 2789-59) чистоту поверхности стали обозначать одним треугольником с цифровым указателем чистоты, например  $\nabla 7$ . Это означает, что поверхность должна иметь седьмой класс чистоты, которому соответствует среднее арифметическое отклонение профиля шероховатости  $Ra$  0,63...1,25. Причем впервые была введена базовая длина для измерения шероховатости.

Были предприняты попытки выделения волнистости и ее оценки по аналогии с шероховатостью. Введено понятие «класс волнистости» в зависимости от ее высоты  $Wz$  [3]:

Высота волнистости, мкм	1	2	4	8	16	32	64	175	250
Класс волнистости	I	II	III	IV	V	VI	VII	VIII	IX

За рубежом параметры волнистости были стандартизованы (таблица).

Таблица

## Стандартизованные параметры волнистости

Страна	Высота волнистости	Высота волнистости		Средний шаг волнистости	Глубина нивелирования волнистости	Среднее арифметическое отклонение волнистости	
		средняя	максимальная				
Франция	$W_t$	$W$	$W_{max}$	$A_w$	$W_p$	$W_a$	
Германия	-		-		-	-	-
Австрия			-		-	-	-
Япония			-		-	-	-
Великобритания			$H_z$		-	-	-

Советскими учеными в работах по трению и износу установлено, что не всегда увеличение чистоты поверхности снижает силу трения и уменьшает износ. Объяснила это явление молекулярно-механическая теория трения И.В. Крагельского [3], согласно которой улучшение чистоты поверхности, т.е. снижение шероховатости, приводит к уменьшению механической составляющей коэффициента трения и к увеличению его молекулярной (адгезионной) составляющей.

Это привело к еще большему пониманию того, что классы чистоты не могут в дальнейшем использоваться для оценки качества поверхности деталей. Теоретические работы советских и зарубежных ученых убедительно свидетельствовали, что долговечность деталей не может быть обеспечена указанием по чертежам класса чистоты поверхности, который характеризовал только высотные параметры шероховатости –  $Ra$  или  $Rz$  (средняя высота неровностей профиля шероховатости по десяти точкам). В частности, Э.В. Рыжовым и Н.Б. Демкиным теоретически и экспериментально было доказано, что такие эксплуатационные свойства, как контактная жесткость и износостойкость, зависят от несущей способности профиля шероховатости, характеризуемой относительной длиной опорной линии  $\eta$  и ее параметрами  $b$  и  $v$  [3; 4]:

$$\eta = b\varepsilon^v,$$

где  $\varepsilon$  – относительное расстояние от линии выступов до рассматриваемого уровня профиля шероховатости. Наряду с этими параметрами проф. Э.В. Рыжов предложил оценивать шероховатость величиной ра-

диуса при вершине выступов и углами наклона боковых сторон их профиля.

Активно ведутся работы по экспериментальному определению фактической площади контакта [4], работы по топографии поверхностей деталей и их оценке. Относительную площадь первоначально предполагалось определять перемножением поперечного и продольного направлений. Однако правило шахматной доски убедительно показало неверность данного подхода, так как при записи профиля в поперечном направлении учитываются и неровности продольного направления.

Все эти работы привели к тому, что в 1973 г., когда в СССР была принята программа повышения качества продукции, был введен стандарт (ГОСТ 2789-73) на параметры шероховатости ( $Ra$ ,  $Rz$ ,  $R_{max}$ ,  $tp$ ,  $Sm$ ,  $S$ ) и взаимное положение следов обработки профиля шероховатости ( $\parallel$  - параллельное,  $\perp$  - перпендикулярное) вместо классов чистоты. В 2017 г. вышел межгосударственный стандарт на параметры шероховатости поверхности, в котором остались все параметры, предусмотренные ГОСТом 1973 г.

В 1980-е гг. многие ученые интенсивно вели теоретические и экспериментальные исследования по установлению взаимосвязи эксплуатационных свойств деталей машин и их соединений (контактной жесткости, износостойкости, усталостной прочности, прочности посадок, герметичности, коррозионной стойкости) со стандартизованными параметрами шероховатости и по их технологическому и метрологическому обеспечению [6; 10].

Так, работы ученых по трению и износу привели к установлению комплексного безразмерного параметра шероховатости  $\Delta = R_{\max} / \rho_m b^{1/3}$  ( $\rho_m$  – радиус выступов профиля шероховатости), характеризующего трение и износ поверхностей. Было выдвинуто положение о равновесной шероховатости поверхностей трения и определено ее комплексное значение:

$$\Delta_{\text{равн}} = 16 \left( \frac{\tau_a}{\alpha_T} \right)^{5/4} \Theta^{3/4} p_c^{1/2},$$

где  $\tau_a$  – адгезионное свойство материала поверхности трения [2];  $\Theta$  – постоянная физико-механических свойств материала;  $p_c$  – контурное давление.

Дальнейшие работы в этом направлении позволили уточнить и объяснить физическую сущность комплексного параметра шероховатости с позиции ее несущей способности [10]:

$$\Delta = \left( \frac{100}{tp} \right)^{1/3} \frac{Rp}{\rho_m}.$$

Было осуществлено математическое описание взаимосвязи различных параметров шероховатости и установлено, что интегрированным параметром, характеризующим несущую способность профиля шероховатости, является высота его сглаживания  $Rp$  (расстояние от линии выступов до средней линии). К этому времени работы по топографии шероховатости показали, что ее параметры практически ничем не отличаются от профильных параметров шероховатости. Это привело к практическому прекращению работ по топографии шероховатости, хотя уже существовали автоматизированные системы, позволяющие строить топографические карты с выделением опорных поверхностей на различных уровнях.

Технологические исследования позволили уточнить возможности различных методов обработки в обеспечении всех стандартизованных и нестандартизованных параметров шероховатости поверхностей, характеризующих их несущую способность. Наряду с экспериментальными зависимостями взаимосвязи всех этих параметров шероховатости с условиями обработки для различных технологических методов были получены и теоретические

зависимости на основе описания физической картины их формирования при обработке [10].

При проведении этих работ было установлено, что для обеспечения и повышения надежности деталей недостаточно нормировать только параметры шероховатости поверхностей, так как она в большой степени зависит и от других характеристик их качества: волнистости, макроотклонения и физико-химических свойств.

Было доказано, что формирование равновесной шероховатости поверхности трения в процессе приработки зависит, в частности, от волнистости, макроотклонения и упрочнения. Это привело к введению понятия равновесного качества поверхности трения [10]. Для оценки волнистости и макроотклонения поверхностей был предложен ряд параметров: средняя высота волн  $Wz$ ; высота сглаживания волн  $Wp$ ; средний шаг волн  $Sm_w$ ; максимальная величина макроотклонения  $H_{\max}$ ; высота сглаживания макроотклонения  $Hp$ .

Для оценки физико-химических свойств поверхностного слоя детали было предложено свыше 25 параметров.

Все большее распространение получают комплексные параметры для оценки качества поверхностей деталей машин П, С,  $C_x$  и др., включающие в себя параметры как шероховатости, волнистости, макроотклонения, так и физико-механических свойств [10].

$$C_x = \frac{(RaWzH_{\max})^{1/6}}{tm^{3/2} Sm^{1/2} U_H^{2/3} \lambda'}$$

где  $\lambda$  – коэффициент, учитывающий влияние поверхностных остаточных напряжений второго рода  $\sigma''_{\text{ост}}$  на износ:

$$\lambda = \left( \frac{\sigma_b - \sigma''_{\text{ост}}}{\sigma_a} \right)^{t_y}.$$

Здесь  $\sigma_b$  – временное сопротивление разрушению;  $\sigma_a$  – действующие значения амплитудного напряжения по поверхности трения;  $t_y$  – параметр фрикционной усталости при упругом контакте.

Технологи активно ведут исследования по технологическому обеспечению всех этих параметров качества поверхностного слоя, устанавливаются возможности методов обработки в их обеспечении.

Появляются теоретические и эмпирические зависимости для их определения для различных условий обработки. Совершенствуются существующие и разрабатываются новые методы обработки, позволяющие повышать качество поверхностного слоя деталей.

Метрологи разрабатывают и создают новые средства контроля всех этих параметров. Начинаются исследования по изучению изменения параметров качества поверхностного слоя деталей при эксплуатации, а также работы по восстановлению качества рабочих поверхностей при ре-

монте. Эти работы убедительно свидетельствуют о том, что качество поверхностного слоя экономически выгодно рассматривать комплексно на всех стадиях жизненного цикла деталей, что и обусловило появление учения об инженерии поверхности.

Анализ несущей способности контактирующих поверхностей показывает, что для ее оценки может быть использован коэффициент контактной жесткости  $j$ . Для подтверждения этой гипотезы требуется проведение дополнительных теоретических и экспериментальных исследований.

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Соколовский, А.П. Жесткость в технологии машиностроения / А.П. Соколовский. – М.: Машгиз, 1946.
2. Крагельский, И.В. Трение и износ / И.В. Крагельский. – М.: Машиностроение, 1966.
3. Рыжов, Э.В. Контактная жесткость деталей машин / Э.В. Рыжов. – М.: Машиностроение, 1966.
4. Демкин, Н.Б. Контактное шероховатых поверхностей / Н.Б. Демкин. – М.: Наука, 1970.
5. Левина, З.М. Контактная жесткость машин / З.М. Левина, Д.Н. Решетов. – М.: Машиностроение, 1971. – 264 с.
6. Сулов, А.Г. Технологическое обеспечение контактной жесткости соединений / А.Г. Сулов. – М.: Наука, 1977. – 104 с.

1. Sokolovsky, A.P. *Stiffness in Engineering Technique* / A.P. Sokolovsky. – M.: Machgiz, 1946.
2. Kragelsky, I.V. *Friction and Wear* / I.V. Kragelsky. – M.: Mechanical Engineering, 1966.
3. Ryzhov, E.V. *Contact Stiffness of Machinery* / E.V. Ryzhov. – Mechanical Engineering, 1966.
4. Dyomkin, N.B. *Rough Surfaces Contacting* / N.B. Dyomkin. – M.: Science, 1970.
5. Levina, Z.M. *Contact Stiffness of Machinery* / Z.M. Levina, D.N. Reshetov. – M.: Mechanical Engineering, 1971. – pp. 264.
6. Suslov, A.G. *Technological Support of Contact Stiffness in Joints* / A.G. Suslov. – M.: Science, 1977. – pp. 104.

7. Контактное твердых тел при статических и динамических нагрузках / Э.В. Рыжов, Ю.В. Колесников, А.Г. Сулов. – Киев: Наукова думка, 1982. – 172 с.
8. Метод определения нормальной контактной жесткости неподвижных стыков: метод. рекомендации. – М.: ВНИИмаш, 1982.
9. Инженерия поверхности деталей / кол. авт.; под ред. А.Г. Сулова. – М.: Машиностроение, 2008. – 320 с.
10. Сулов, А.Г. Качество поверхностного слоя деталей машин / А.Г. Сулов. – М.: Машиностроение, 2000. – 320 с.

7. *Solids Contacting at Static and Dynamic Loads* / E.V. Ryzhov, Yu.V. Kolesnikov, A.G. Suslov. – Kiev: Scientific Thought, 1982. – pp. 172.
8. *Method for Contact Stiffness Definition in Fixed Joints: methodical recommendations*. – M.: AR-RIMach, 1982.
9. *Engineering of Parts Surfaces* / authors' group; under the editorship of A.G. Suslov. – M.: Mechanical Engineering, 2008. – pp. 320.
10. *Suslov, A.G. Quality of Machinery Surface Layer* / A.G. Suslov. – M.: Mechanical Engineering, 2000. – pp. 320.

Статья поступила в редакцию 27.08.18.

Рецензент: д.т.н., профессор РГАУ им. П.А. Соловьева  
Безьязычный В.Ф.

Статья принята к публикации 10.10.18.

### Сведения об авторах:

Сулов Анатолий Григорьевич, д.т.н., профессор Брянского государственного технического университета, e-mail: [naukatm@mail.ru](mailto:naukatm@mail.ru).

Suslov Anatoly Grigorievich, Dr. Sc. Tech., Prof., Bryansk State Technical University, e-mail: [naukatm@mail.ru](mailto:naukatm@mail.ru).

