



РОССИЯ

ISSN 1562-322X

ТЕХНОЛОГИЯ МАШИНОСТРОЕНИЯ

2010 № 6

СТАНДАРТИЗАЦИЯ И УПРАВЛЕНИЕ КАЧЕСТВОМ ПРОДУКЦИИ

УДК 621.791:006

П. А. ТОПОЛЯНСКИЙ, канд. техн. наук, А. П. ТОПОЛЯНСКИЙ, инж.,
Н. А. СОСНИН, д-р техн. наук, С. А. ЕРМАКОВ, канд. техн. наук
НПФ "Плазмацентр" (С.-Петербург)
E-mail: conf@plasmacentre.ru

Применение международных стандартов для оценки свойств поверхностей, подверженных износу

Параметры шероховатости, указываемые в конструкторской документации применительно к рабочим поверхностям деталей, инструмента и оснастки, подверженных износу, в соответствии с российскими стандартами не характеризуют их износостойкость. На примере технологии финишного плазменного упрочнения с нанесением тонкопленочного износостойкого покрытия дан анализ применения международных стандартов ISO 4287:1997 и ISO 13565-2:1996, характеризующих свойства поверхности с точки зрения применения параметров шероховатости, отвечающих за долговечность рабочих поверхностей.

Ключевые слова: международные стандарты, параметры шероховатости, упрочнение, тонкопленочное покрытие

Roughness parameters indicated in the design documentation with respect to parts working surface and tooling subject to wear, according to Russian standards do not describe their wear resistance. By the example of the finish plasmatic hardening with the application of a thin film wear-resistant coating the analysis of international standards ISO 4287:1997 and ISO 13565-2:1996 characterizing surface properties in terms of using roughness parameters respondent for durability of working surfaces was made.

Key words: international standards, roughness parameters, strengthening, thin-film coating

Перед технологами часто встает задача выбора упрочняющей технологии или метода нанесения функционального покрытия применительно к повышению долговечности конкретной изнашиваемой детали. Укрупненно все технологии упрочнения можно разделить на две большие группы: с последующей механической обработкой и без нее. Ко второй группе относятся так называемые финишные методы, повышающие долговечность за счет формирования поверхностных слоев с антисхватывающимися свойствами, получения оптимальных параметров шероховатости, остаточных напряжений и рационального распределения микротвердости. Очевидно, что финишные технологии упрочнения при условии одинакового увеличения стойкости деталей имеют экономические преимущества и наиболее эффективны.

Известно [1], что из общего числа деталей, инструмента и оснастки, подлежащих замене, восстановлению или переточке, порядка 10—15 % выходят из строя из-за случайных поломок, а около 85—90 % — вследствие физического износа. В большинстве случаев критерием отбраковки (замены, ремонта, переточки) является износ, равный 0,1—0,3 мм, что предопределяет эффективность упрочнения тонких поверхностных слоев. При этом около 40 % изнашиваемых деталей от физического износа подлежат отбраковке в результате процессов схватывания, результатом которого является вырыв частиц металла на одних участках поверхностей и налипание этих частиц на другие участки поверхностей [1]. Таким образом, возможность получения антисхватывающих свойств рабочих поверхностей вследствие тех-

нологий упрочнения является наиболее перспективным мероприятием. К методам уменьшения схватывания относятся: нанесение неметаллических покрытий; повышение твердости поверхности; уменьшение коэффициента трения; подбор сопряженных пар, не склонных к схватыванию; увеличение теплоустойчивости поверхностей трения; уменьшение температуры поверхностного слоя.

Геометрические параметры изнашиваемых поверхностей деталей, инструмента, оснастки в процессе эксплуатации не сохраняют постоянных значений. Они изменяются во времени чаще всего по кривой Лоренца (рис. 1), которая характеризуется тремя периодами: приработка, установившееся и катастрофическое изнашивание [2]. В зависимости от исходных свойств трущихся рабочих поверхностей длительность периодов может из-

меняться в несколько раз. При этом износ за время приработки может достигать 30—50 % предельного износа [3]. Поэтому целесообразно уже на стадии окончательного изготовления деталей предусматривать финишную технологическую операцию, которая минимизирует именно длительность приработки.

Для деталей, инструмента, оснастки, подверженных износу, финишной операцией при их изготовлении в основном является абразивная обработка. В большинстве случаев в соответствии с российскими требованиями ЕСКД параметром шероховатости, указываемым для изнашиваемых поверхностей, является среднее арифметическое отклонение про-

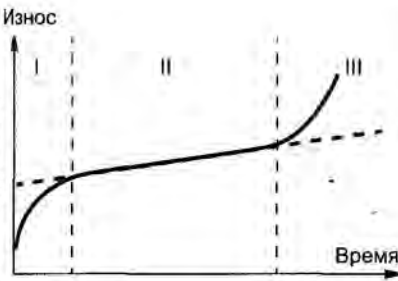


Рис. 1. Стадии изнашивания: I — приработка; II — стабильный износ; III — катастрофический износ

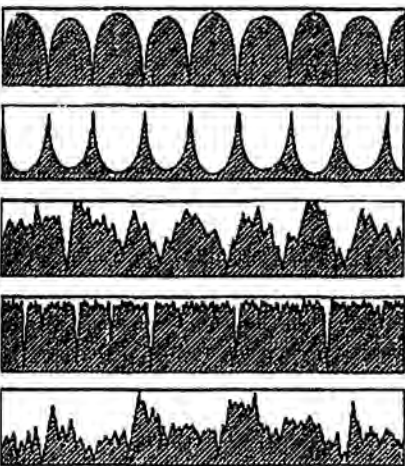
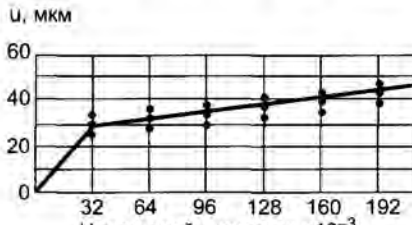
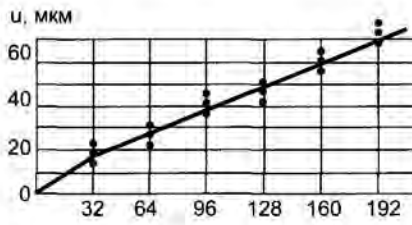


Рис. 2. Профили поверхностей с одинаковым параметром шероховатости Ra и разной интенсивностью изнашивания



а)

б)

Рис. 3. Износ (а) поверхностей при одинаковой высоте среднего арифметического отклонения профиля Ra для разного среднего шага неровности профиля Sm (б)

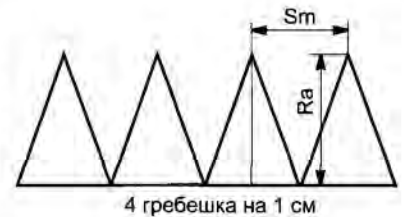
филя Ra , которое, как известно, не содержит информации о форме неровностей профиля и, соответственно, их износостойкости (рис. 2) [4].

На процесс изнашивания также влияет средний шаг неровности профиля Sm (рис. 3), значение которого для минимизации износа необходимо уменьшать [5]. Поэтому целесообразно применять такую финишную упрочняющую обработку, которая обеспечивает получение минимального значения Sm .

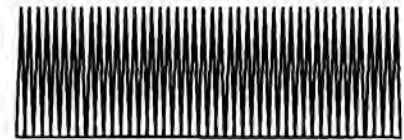
Известно, что увеличение радиуса закругления выступов r ведет к увеличению несущей поверхности профиля и, соответственно, износостойкости данной поверхности. При разном моделировании выступов (рис. 4) износ поверхности с плоскими площадками в 3 раза меньше, чем с остроконечными [5]. Поэтому наиболее эффективно применять такую финишную упрочняющую обработку, которая обеспечивает максимальное значение r .

Радиус закругления выступов, связанный с параметрами шероховатости, по ГОСТ 2789 [6]

$$r = 9Ra^2Sm^2 / 128(Rp - 0,5Ra)^3,$$



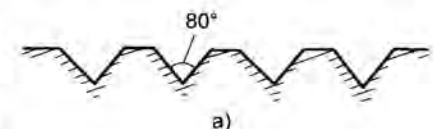
4 гребешка на 1 см



44 гребешка на 1 см

где Ra — среднее арифметическое отклонение профиля; Sm — средний шаг неровностей профиля; Rp — наибольшая высота выступа.

В соответствии с международным стандартом ISO 13565-2:1996 вводятся параметры шероховатости Rpk , Rk , Ryk , которые определяют при обработке опорной поверхности — кривой Аббота-Файрстона, характеризующей распределение материала по высоте шероховатого слоя. При этом более долговечной является поверхность, имеющая более пологую опорную кривую (меньшие значения параметров Rk и Rpk). Действительно, кривая опорной поверхности после приработки в период установившегося изна-



а)



б)

Рис. 4. Выступы поверхности с плоскими (а) и остроконечными площадками (б)

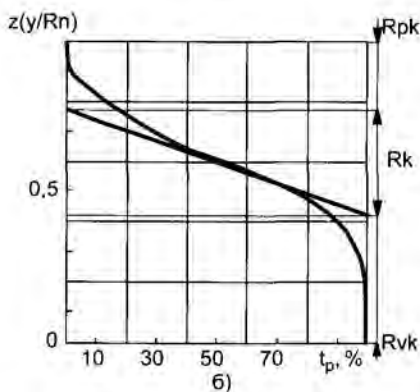
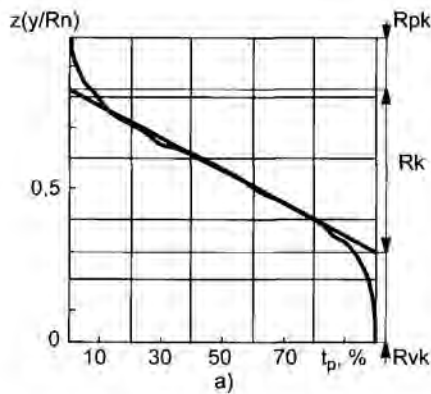


Рис. 5. Кривая опорной поверхности с разным средним шагом неровностей профиля S_m , равным 116,14 (а) и 77,54 (б) мкм

шивания становится более пологой, что соответствует и более высокой ее износостойкости.

Для определения влияния среднего шага неровностей профиля S_m на сумму параметров $Rpk + Rk$ исследовали две поверхности с одинаковым параметром шероховатости Ra (рис. 5). При этом с уменьшением S_m на 30 % сумма параметров $Rpk + Rk$ уменьшается на 12 %, что характеризует поверхность (см. рис. 5, б) как более износостойкую.

Более износостойкой поверхности соответствует также и меньшее значение безразмерного критерия [7]

$$\Delta = R_{max}/Rb^{1/\gamma},$$

где R_{max} — наибольшая высота неровностей профиля; R — средний радиус закругления вершин микронеровностей; b, γ — параметры кривой опорной поверхно-

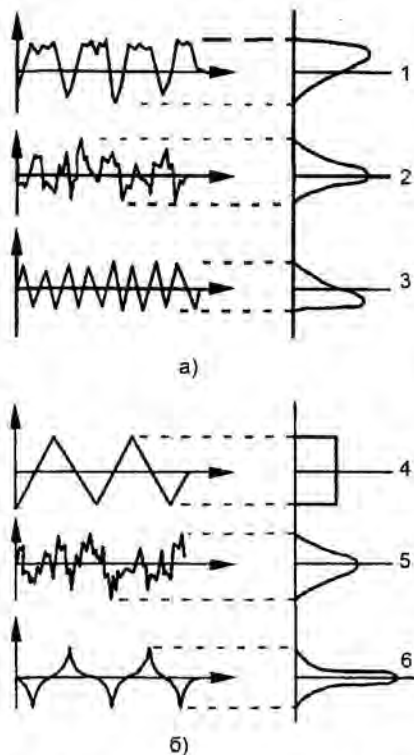


Рис. 6. Изменение параметра асимметричности (а) и островершинности (б) профиля для разных профилограмм поверхности: 1—3 — Rsk меньше, равен и больше нуля соответственно; 4—6 — Rku меньше, равен и больше 3 соответственно

сти. Это подтверждается также тем, что в процессе приработки критерий Δ монотонно уменьшается.

В соответствии с международным стандартом ISO 4287:1997 профилограмма поверхности кроме известных параметров (Ra, R_{max}, S_m) оценивается дополнительными параметрами [4]:

— Rsk — характеризующий асимметричность профиля, при этом поверхность с лучшими опорными свойствами имеет отрицательное значение Rsk (рис. 6, а);

— Rku — определяющий островершинность профиля, значение которого характеризует остроту кривой плотности распределения выступов и впадин (рис. 6, б). Если значительная часть выступов и впадин сконцентрирована около средней линии поверхности, то $Rku = 3$. Оптимальным значением данного параметра для поверх-

ностей, работающих в условиях трения и износа, является величина, близкая к 3;

— Rdq — среднее квадратическое значение наклонов профиля в пределах базовой длины, равное $\sqrt{1/l} \int (dz/dx)^2 dx$, где dz/dx — тангенс угла наклона в точке профиля (рис. 7). При этом меньшее значение данного параметра соответствует более высоким антифрикционным характеристикам поверхности;

— RMr — отношение опорной длины профиля к базовой длине (чем выше его значение, тем больше опорная поверхность профиля).

Рассмотрим влияние технологии финишного плазменного упрочнения (ФПУ) с нанесением тонкопленочного износостойкого покрытия на основе оксикарбонитрида кремния [8] на параметры шероховатости по международному стандарту ISO 4287:1997.

Процесс ФПУ изделий, изготавливаемых с помощью традиционных методов, применяется на заключительной стадии их изготовления, поэтому он назван финишным плазменным упрочнением. Отличительными его особенностями являются: осуществление процесса при атмосферном давлении, без вакуума; минимальный нагрев изделий при обработке, составляющий порядка 100—150 °С; возможность обработки труднодоступных зон и изделий любых габаритных размеров; локальность нанесения покрытия; использование малогабаритного, мобильного и экономичного оборудования.

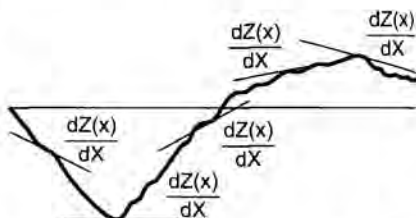


Рис. 7. Определение тангенса угла наклона в точке профиля

Таблица 1

Параметр	До ФПУ	После ФПУ
<i>Ra</i>	0,169	0,122
<i>Rmax</i>	1,034	0,785
<i>Sm</i>	15,1	13,569
<i>Rsk</i>	0,193	-0,016
<i>Rku</i>	3,149	3,276
<i>Rdq</i>	0,125	0,097
<i>RMr</i>	99,38 %	100 %

В качестве источника тепловой энергии для нанесения износостойкого покрытия при ФПУ применяют плазменную струю, истекающую при атмосферном давлении из малогабаритного дугового плазмотрона, оснащенного плазмохимическим генератором. Плазменная струя, полученная от сжатой дуги косвенного действия, предопределяет возможность упрочнения изделий любых размеров и во всех пространственных положениях, а также гибкость в управлении.

Основным принципом нанесения тонкопленочного износостойкого покрытия на основе оксикарбонитрида кремния, взятым за основу технологии ФПУ, является разложение паров жидких технологических препаратов, вводимых в плазмохимический генератор дугового плазмотрона, с последующим прохождением плазмохимических реакций и образованием покрытия на изделии. Нанесение покрытия осуществляется локально на упрочняемую поверхность изделия при циклическом сканировании плазменной струи, которая касается обрабатываемой зоны. Важной отличительной особенностью ФПУ является также то, что нанесение покрытия осуществляется многослойно при толщине каждого слоя порядка 2—10 нм полосами шириной 8—10 мм (с учетом линейного перемещения плазменной струи). Для минимального термического воздействия на материал основы при ФПУ плазменную струю перемещают со скоростью 3—150 мм/с.

С применением данной технологии возможно упрочнение деталей, изготовленных из материалов с низкой температурой отпуска (порядка 150—180 °С); деталей в сборе (например, группы пуансонов, заранее закрепленных в металлической подушке, стеклоформирующей оснастки в сборе с водоохлаждаемым корпусом и др.); деталей, с минимальными

габаритными размерами; паяных изделий; деталей, обладающих повышенной газопроницаемостью; деталей из разнородных материалов; длинномерных изделий; деталей единичных партий.

Влияние технологии ФПУ на изменение параметров шероховатости оценивали на образцах, изготовленных из стали X12M диаметром 15 мм и толщиной 5 мм. После проведения термической обработки до твердости 58—60 HRC торцовые поверхности образцов шлифовали. Одна из половин торцовой поверхности закрывалась маской, а на другую наносили износостойкое покрытие толщиной порядка 1 мкм методом ФПУ на оптимальном режиме. Толщину покрытия контролировали прибором УФПУ-П20-03 [8].

Параметры шероховатости измеряли согласно стандарту ISO 4287:1997 с использованием профилометра Perthometer S2 (фирма Mahr GmbH, Германия) на исходной поверхности под маской, на зоне с покрытием и на зоне перехода. В табл. 1 приведены средние значения параметров шероховатости поверхности до и после ФПУ после измерений трех одинаковых образцов в каждой серии.

При сравнении численных значений параметров шероховатости после ФПУ заметна тенденция получения более благоприятной поверхности по антифрикционным свойствам.

Определение толщины нанесенного покрытия при ФПУ осно-

вывается на замере расстояния между средними линиями профилограммы переходной зоны — участок с покрытием — участок без покрытия. При этом покрытие наносится на образец с использованием маски.

Параметры шероховатости до и после ФПУ измеряли согласно стандарту ISO 13565-2:1996 с построением кривой Аббота-Файрстона с использованием измерительно-вычислительного комплекса "Профиль" [8], включающего стандартный профилограф-профилометр 201, персональный компьютер, интерфейс связи профилографа с компьютером и пакет прикладных программ. В табл. 2 приведены значения параметров шероховатости до и после нанесения покрытия методом ФПУ при различном исходном параметре *Ra*. Видно, что процесс ФПУ способствует повышению несущей площади поверхности и ее износостойкости по критерию $Rpk + Rk$, который уменьшается в среднем в 2 раза.

Микрорельеф переходной зоны — участок с покрытием — участок без покрытия исследовали с применением прибора MarSurf WS1 (фирма Mahr GmbH, Германия). Видно (рис. 8), что в зоне без покрытия (слева) имеются достаточно глубокие впадины, имеющие размер в соответствии с масштабной линейкой порядка 1,0—1,2 мкм, оставшиеся от абразивной обработки исходной поверхности. В зоне с покрытием (справа) впадины имеет глубину порядка 0,1 мкм. Таким образом, после ФПУ обеспечивается залечивание микродефектов и практически всех впадин исходной шероховатости. Это связано с тем, что покрытие по своей физической сущности осаждается в большей степени во впадинах микрорельефа поверхности, так как микрополости являются более вероятным местом зарождения образования покрытия, чем плоская поверхность [9]. На этом

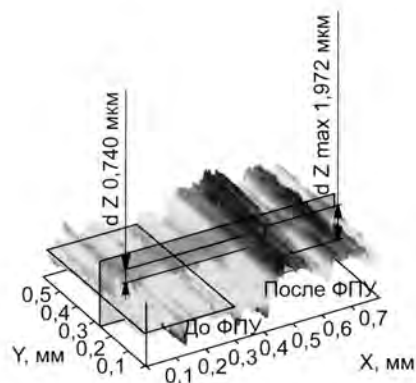


Рис. 8. Трехмерная профилограмма переходной зоны

же явлении основывается и повышенная адгезия наносимого покрытия при ФПУ, связанная с увеличением площади фактического контакта и числа связей между покрытием и подложкой.

На основании анализа параметров шероховатости по международным стандартам можно проводить предварительную аттестацию и оценивать поверхности с точки зрения эффективности их работы в условиях трения и износа. Эксплуатационные испытания изделий после ФПУ [8] подтверждают

эффективность данной технологии применительно к деталям, инструменту и технологической оснастке, работающим в условиях трения и износа. На рис. 9 приведены отдельные примеры применения ФПУ, подтвердившие повышение их эксплуатационной стойкости минимум в 2 раза.

ВЫВОД

Применение параметров шероховатости согласно стандартам ISO 4287:1997 и ISO 13565-2:1996 для изделий после финишного плазменного упрочнения с нанесением износостойкого тонкопленочного покрытия позволяет оценить функциональные свойства поверхностей и объективно прогнозировать повышение эксплуатационной стойкости упрочненных деталей. Данные стандарты можно использовать и для других аналогичных технологий упрочнения с целью аттестации поверхностей, подверженных износу, и повышения качества выпускаемой продукции.

Таблица 2

Исследуемая поверхность	Ra	Rmax	Rpk	Rk	Rvk	Rpk + Rk
До нанесения покрытия	0,08	0,69	0,35	0,22	0,12	0,57
После нанесения покрытия	0,07	0,44	0,10	0,20	0,14	0,30
До нанесения покрытия	0,43	4,17	2,09	1,25	0,83	3,34
После нанесения покрытия	0,38	2,85	0,71	1,00	1,14	1,71
До нанесения покрытия	0,72	5,07	0,89	2,66	1,52	3,55
После нанесения покрытия	0,31	3,47	0,69	0,69	1,27	1,39



а)



б)



в)



г)

Рис. 9. Процесс ФПУ с нанесением износостойкого тонкопленочного покрытия: а — матрицы вырубного штампа; б — холодновысадочный инструмент; в — метчик; г — пресс-формы литья под давлением

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Голего Н. Л. Схватывание в машинах и методы его устранения. Киев: Техніка, 1965. 232 с.
2. Пенкин Н. С., Пенкин А. Н., Сербин В. М. Основы трибологии и триботехники. М.: Машиностроение, 2008. 206 с.
3. Трение, износ и смазка (трибология и триботехника) / А. В. Чичинадзе, Э. М. Берлинер, Э. Д. Браун и др. М.: Машиностроение, 2003. 576 с.
4. Табенкин А. Н., Тарасов С. Б., Степанов С. Н. Шероховатость, волнистость, профиль. Международный опыт. С.-Петербург: Государственный политехнический университет, 2007. 136 с.
5. Маталин А. А. Технологические методы повышения долговечности машин. Киев: Техніка, 1971. 142 с.
6. Рыжов Э. В., Суллов А. Г., Федоров В. П. Технологическое обеспечение эксплуатационных свойств деталей машин. М.: Машиностроение, 1979. 176 с.
7. Комбалов В. С. Влияние шероховатости твердых тел на трение и износ. М.: Наука, 1974. 112 с.
8. Соснин Н. А., Ермаков С. А., Тополянский П. А. Плазменные технологии. Руководство для инженеров. С.-Петербург: Государственный политехнический университет, 2008. 406 с.
9. Хирс Д., Лаунд Г. Испарение и конденсация. М.: Металлургия, 1966. 196 с.