
**НАДЕЖНОСТЬ, ПРОЧНОСТЬ,
ИЗНОСОСТОЙКОСТЬ МАШИН И КОНСТРУКЦИЙ**

УДК 621.822

**РАЗРАБОТКА МЕТОДИКИ ПОЛУЧЕНИЯ ИОННЫМ ТРАВЛЕНИЕМ
ПРОФИЛИРОВАННОГО РЕЛЬЕФА РАЗЛИЧНОГО ВИДА
НА ПОВЕРХНОСТЯХ ТРЕНИЯ**

© 2023 г. И. С. Сплавский

*Институт машиноведения им. А.А. Благонравова РАН, Москва, Россия**e-mail: spl-igor@yandex.ru*

Поступила в редакцию 16.01.2023 г.

После доработки 05.06.2023 г.

Принята к публикации 20.06.2023 г.

В статье рассмотрены существующие методы создания регулярного профилированного микрорельефа различного вида от микро- до макрорельефа на плоских функциональных поверхностях изделий. Представлена методика ионного травления регулярного микрорельефа на поверхностях трения упорных подшипников скольжения, предлагаемая для узлов трения энергетического оборудования и погружных насосов.

Ключевые слова: опорно-упорный подшипник, рельеф поверхности, покрытия, коэффициент трения

DOI: 10.31857/S0235711923050152, **EDN:** XAKIFY

Известным методом повышения триботехнических свойств поверхности даже без применения твердосмазочного покрытия является создание регулярного профилированного микрорельефа (РПМР) (углублений) поверхностным пластическим деформированием, например виброобкатыванием, алмазным выглаживанием и т.п. [1]. Создание рельефа на функциональных поверхностях возможно также путем нанесения несплошных покрытий или покрытий переменной толщины.

В технологии изготовления интегральных схем широко применяют методы фрагментации поверхности путем химического или ионного травления отдельных участков поверхности определенной формы и размеров через маскирующие шаблоны, получаемые с помощью фотолитографии [2]. Высокая разрешающая способность (до 1 мкм) ионного травления, возможность обработки материалов любой твердости и хорошая «стыкуемость» с вакуумной ионно-плазменной технологией нанесения защитных покрытий позволяют эффективно решить вопрос получения тонких поверхностных слоев с высокой износостойкостью и антифрикционностью. Перспективность такого решения подтверждается появившимися публикациями о методах получения поверхностных композиционных ультратонких слоев с высокими триботехническими свойствами. В работах [3, 4] показана техника получения и конструкция поверхности с РПМР, получаемым ионным травлением с использованием маски, создаваемой на поверхности фотолитографическим способом или лазерным воздействием через маскирующий шаблон.

Физический механизм удаления материала при ионном травлении позволяет применять этот процесс для травления материалов любой природы и твердости: металлов, полупроводников, диэлектриков. При ионном травлении можно обеспечить такой ре-

жим, при котором ионы бомбардируют материал перпендикулярно к его поверхности или под определенным углом, что способствует получению четких, резких и вполне определенных очертаний краев и углублений.

Процессы ионно-плазменного нанесения покрытий также можно использовать для создания рельефа и профилей на поверхности.

Комбинированные ионно-плазменные способы формирования углублений различной формы представляются наиболее перспективными, т.к. все большее применение в прецизионных узлах находят детали, имеющие на рабочих поверхностях покрытия, полученные вакуумными ионно-плазменными методами. Создание на таких поверхностях углублений или канавок заданного профиля также возможно при использовании ионного травления [5].

В настоящее время существует значительное количество разнообразных конструктивных схем систем ионного травления.

Повышение скорости распыления можно достичь путем применения автономных ионных источников для генерации ионных потоков, их фокусировки и ускорения в направлении обрабатываемой поверхности. Плотность ионного тока в таких системах может достигать нескольких ампер. Возможность фокусировать и сканировать пучки обеспечивает высокую равномерность травления. Кроме того, эффективность таких систем значительно выше благодаря тому, что рабочее давление в вакуумной камере существенно ниже, чем при использовании плазменных систем.

Из анализа существующих, проектируемых и разрабатываемых с различной целью ионных источников для создания регулярного поверхностного рельефа внимание заслуживают и многоапертурный источник газообразных ионов типа Кауфмана, ионный источник, генерирующий потоки быстрых нейтральных молекул и ионно-плазменный источник кольцевого (щелевого) типа.

Рассмотрим предлагаемую в настоящей статье технику получения поверхностей с регулярным профилированным микрорельефом и углублениями протяженной длины для гидродинамических условий трения.

Технология получения фрагментированных поверхностей – поверхностей с регулярным профилированным микрорельефом заключается в травлении участков поверхности твердого тела с помощью ионов инертного газа. Для получения РПМР используются маски из фольги толщиной 0,2–0,5 мм с регулярно расположенными в ней отверстиями, как правило, круглой или эллиптической формы (рис. 1). Такие отверстия получают методом фотолитографии с разрешением до единиц микрометров. Возможно использование для изготовления масок “тонких” металлических сеток, имеющих прямоугольные отверстия.

Вырезанная по размерам обрабатываемой поверхности маска жестко закрепляется на поверхности, и деталь подвергается ионному травлению в вакуумной камере ионами аргона из ионного источника. Обработка ведется при режимах, обеспечивающих отсутствие теплового коробления маски и изделия и получение заданной глубины рельефа по всей обрабатываемой поверхности. После обработки изделие извлекается из вакуумной камеры и маска удаляется. Далее на обработанную поверхность при необходимости создается антифрикционный слой тем или иным методом (предпочтительно вакуумным ионно-плазменным) наносят антифрикционный твердый материал [6].

В случае необходимости повышения износостойкости поверхности фрагментированный слой создается как твердое износостойкое покрытие, которое предварительно наносят на рабочую поверхность. При работе в среде жидкой смазки РПМР может быть достаточно эффективен без введения в него твердого смазочного материала.

Для повышения износостойкости поверхности при трении всухую в присутствии твердосмазочного покрытия предложено техническое решение [7], заключающееся в том, что на поверхности трения подшипника скольжения изготовленного из компактного антифрикционного материала, например, кобальта, меди или медного сплава,

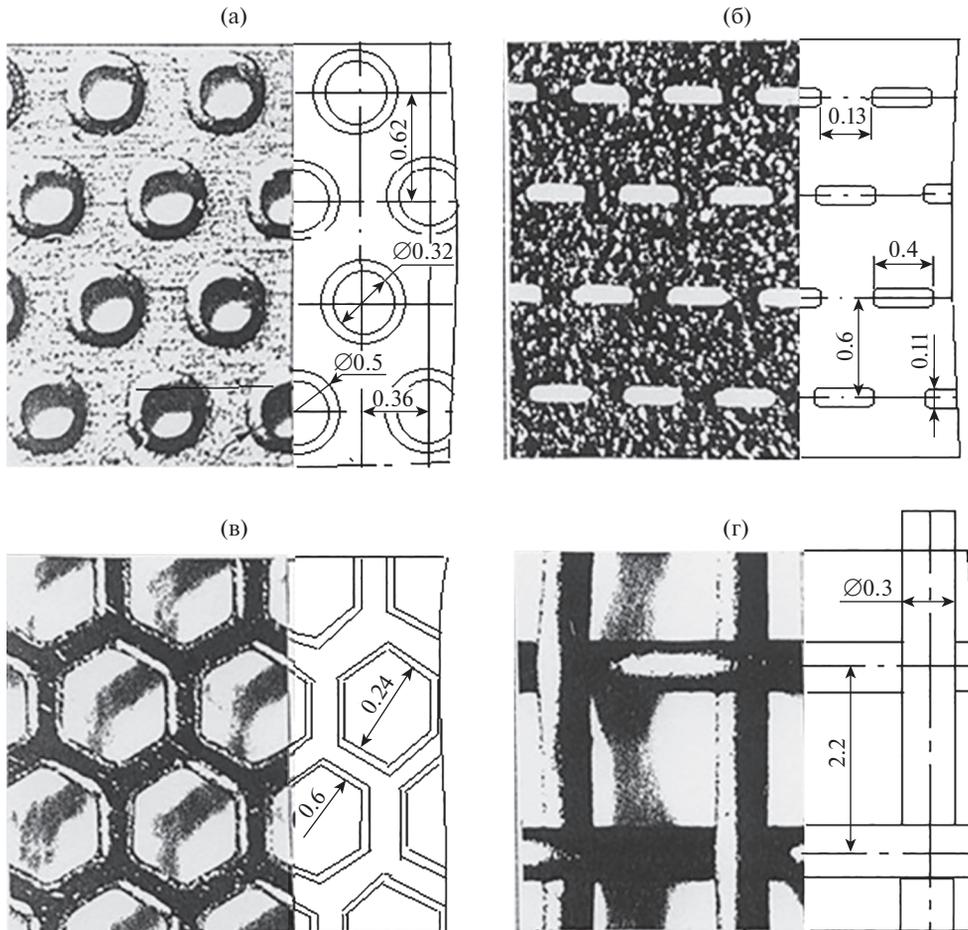


Рис. 1. Маски, используемые для создания РПМР: (а) – с круглыми отверстиями; (б) – с овальными отверстиями; (в) – с шестигранными отверстиями; (г) – плетеная сетка из нержавеющей стали.

методом ионного травления в вакууме через маску, наносится рисунок, состоящий из регулярно расположенных по поверхности углублений. Глубина травления определяется временем и режимом ионной бомбардировки. После завершения процесса травления маска удаляется, и поверхность трения подвергается тонкой механической обработке (доводке) до достижения требуемой плоскостности и шероховатости.

Для получения регулярного профилированного микрорельефа на рабочих поверхностях деталей узлов трения, по результатам исследований, проведенных в Институте машиноведения РАН, для реализации целей настоящей статьи рекомендуется использовать ионный газовый источник типа Кауфмана (МАИ-208-2Т), разработки Московского авиационного института.

На рис. 2 представлена принципиальная схема ионного источника МАИ-208-2Т с полым катодом, рабочим телом которого является аргон. В корпусе 1 расположен полый катод 2, через который в источник поступает аргон. Между катодом и анодом 3 в атмосфере аргона при давлении 5 Па зажигается дуговой разряд с параметрами $U = 20\text{--}60$ В и $I = 2\text{--}10$ А. Для облегчения поджига разряда катод предварительно

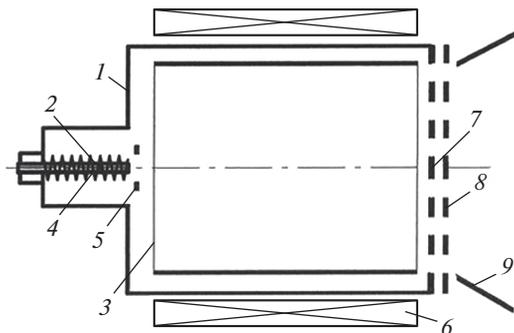


Рис. 2. Принципиальная схема ионного газового источника МАИ-208-2Т.

разогревается нитью косвенного нагревателя 4. Непосредственно разряд инициируется искровым пробоем между катодом и электродом поджига 5. Для увеличения степени ионизации в камере источника установлена магнитная катушка 6. При помощи электронно-оптической системы, состоящей из экранирующей сетки 7, ускоряющей сетки 8 и экрана 9 ионы аргона вытягиваются из камеры источника и ускоряются до энергии порядка 2–10 кэВ в направлении устанавливаемых перед источником обрабатываемых деталей.

Режимы ионного травления следующие: напряжение разряда 30–40 В, ток разряда 6 А, ток магнитной катушки 2 А, напряжение ускоряющей сетки 2.5 кВ, ионный ток пучка 130 мА, скорость травления 0.1 мкм/мин. При нормальной работе источника ионный ток в пучке диаметром 80 мм составляет 120–180 мА.

При ионном травлении можно обеспечить такой режим, при котором ионы бомбардируют материал перпендикулярно к его поверхности или под определенным углом, что способствует получению четких резких и вполне определенных очертаний краев и углублений. Это можно использовать при изготовлении макрорельефа (протяженных криволинейных канавок) на опорных подушках подпятников, работающих в режиме гидродинамической смазки.

Для обеспечения требуемой равномерности по глубине канавок при выполнении условия обеспечения высокой производительности процесса одним из важнейших условий является выбор оптимального расстояния от ускоряющей сетки источника до обрабатываемой поверхности и участка потока, в котором происходит травление детали. Следует принимать во внимание, что диаметр ионного потока зависит от конструкции источника и плотность потока по его сечению неравномерна (уменьшается при движении от центра к периферии). Поэтому, работая с подобного рода системами, необходимо использовать не всю площадь сечения потока, а лишь его эффективную часть, в которой плотность изменяется мало. Графически это показано на рис. 3.

Диаметр пучка ионов при выходе из источника 1 будет равен диаметру сетки оптической системы, по мере удаления от источника пучок несколько расходится, и на некотором расстоянии l от него будет иметь диаметр $D_{и}$. Распределение плотности потока, в перпендикулярной оси источника плоскости, находящейся на расстоянии l от выходной сетки источника характеризуется кривой 2 (рис. 3). Окружность диаметром $D_{эф}$ ограничивает зону пучка с приемлемой равномерностью плотности потока, обеспечивающей требуемую равномерность травления.

Размещение изделия должно осуществляться таким образом, чтобы обрабатываемая поверхность находилась в пределах зоны, ограниченной эффективным диаметром

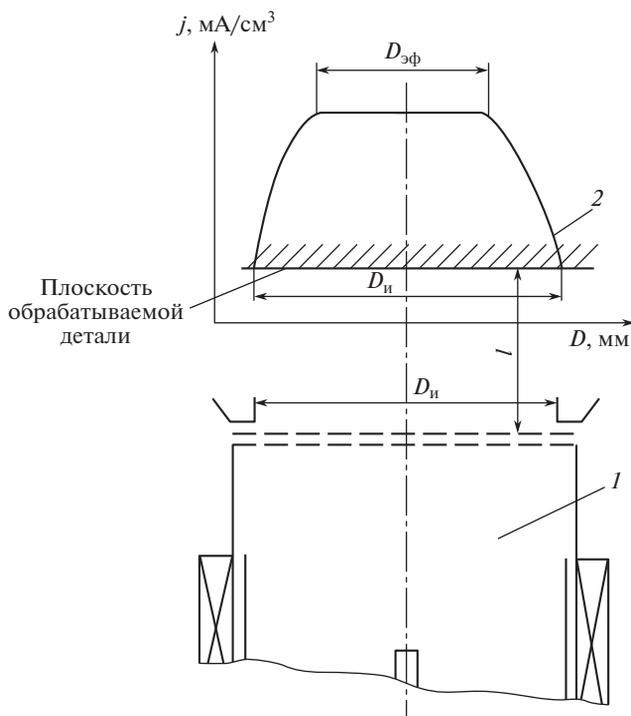


Рис. 3. Распределение плотности ионного тока.

пучка $D_{эф}$. Если это условие не будет соблюдено, то неравномерность глубины получаемой канавки будет в радиальном направлении выходить за пределы допуска.

Удаление обрабатываемого изделия от источника увеличивает равномерность травления, но приводит к потере производительности вследствие уменьшения плотности потока. Чрезмерное приближение изделия к источнику может привести к перегреву и короблению маски, а также к перегреву изделия и возникновению в нем больших внутренних и остаточных напряжений. Следствием этого является коробление изделия и даже его растрескивание, что наблюдалось при обработке керамических материалов с низкой теплопроводностью.

Углубления (канавки) значительно больших размеров можно использовать как газо- и гидродинамические канавки в подшипниках и опорах, работающих с газовой или жидкой смазками.

Выводы. Рассмотрены и проанализированы существующие методы создания регулярного профилированного микрорельефа различного вида от микро- до макрорельефа на плоских функциональных поверхностях изделий. Разработана методика ионного травления регулярного микрорельефа на поверхностях трения упорных подшипников скольжения, предлагаемая для узлов трения энергетического оборудования и погружных насосов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Шнейдер Ю.Г. Регуляризация микрорельефов поверхностей деталей. Л.: ЛАНТП, 1986. 24 с.
2. Иванов-Есипович Н.К. Технология микросхем. М.: Высшая школа, 1972. 256 с.

3. *Lancastre J.K., Moorhouse P.* Etched-pocket dry bearing materials // Tribology International. 1985. V. 18. № 3. P. 139.
4. *Tanaka H., Takeda J., Nakamura K.* Patent US 6008468. Method and apparatus for producing a thin mesh utilizing a laser and mask system, 1999.
5. *Андрейчикова Г.Е., Захарова Н.Е., Румянцев М.Ю., Сигачев С.И., Станкевич И.В.* История создания и перспективы применения твердосмазочных покрытий для лепестковых газодинамических опор высокоскоростных электротурбомашин // Вестник Московского энергетического института. 2016. № 4. С. 51.
6. *Черемисинов Е.М., Славский И.С.* Исследование работоспособности осевых высоконагруженных опор в насосах атомной отрасли в зависимости от условий эксплуатации // Проблемы машиностроения и автоматизации. 2022. № 4. С. 31.
https://doi.org/10.52261/02346206_2022_4_31
7. *Сытин А.В., Родичев А.Ю., Зайцев П.Е., Михалевский С.А.* Технологии нанесения ультратонких смазочных пленок при изготовлении упругих элементов лепестковых газодинамических подшипников // В сборнике: Будущее науки-2017. Сборник научных статей 5-й Международной молодежной научной конференции: в 4-х томах. Ответственный редактор А.А. Горохов, 2017. С. 184.