

лило необходимость в качестве упругого элемента использовать плоскую тарированную пружину 2, поджимающую с определенным усилием рабочий шар 5 к обрабатываемой поверхности (вибронакатывание винтовой поверхности производится по схеме, показанной на рис. 28). Цилиндрическим хвостовиком корпуса 1 державка закрепляется в осциллирующем элементе виброголовки. К корпусу двумя винтами 6 при помощи планки 3 крепится пружина 2, удерживающая шар 5 от выпадания из отверстия в корпусе 1; с другой стороны шар упирается в бронзовый подпятник 4.

Общим недостатком шариковых державок с сепараторами, удерживающими шарик от выпадания и ограничивающими его движение

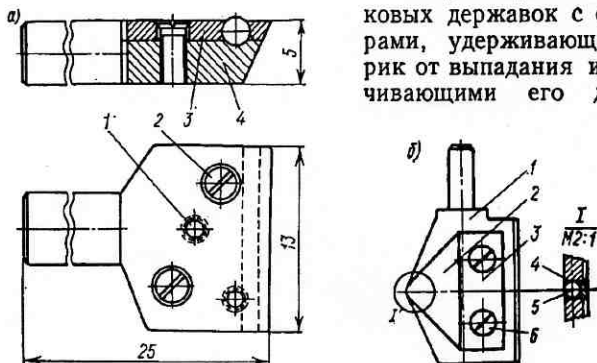


Рис. 40. Малогабаритные шариковые державки

относительно корпуса державки в направлении подачи, является увеличение зазора между шаром и стенками рабочего отверстия сепаратора вследствие его износа и износа опоры шара, что приводит к искажению профиля выдавливаемой синусоидальной канавки при вибронакатывании поверхностей любой формы.

В державке ¹, показанной на рис. 41, этот недостаток устранен следующим образом. Недопустимо возрастающий в результате износа опоры 6 и сепаратора 4 зазор между рабочей его поверхностью и шаром 7 компенсируется поджатием втулки 5, удерживающей фторопластовую или другую опору, пружиной 3, натяг которой создается гайкой 1. После установки гайки 1 в требуемое положение она фиксируется контргайкой 2.

На рис. 42 показаны малогабаритные державки ² для обработки нежестких деталей малых размеров. Для вибронакатывания отверстий диаметром менее 6 мм в деталях из сырых и термически обработанных сталей и цветных металлов применяется державка, приведенная на рис. 42, а. Она состоит из оправки 5, втулки-сепаратора 4, фторопластового регулировочного клина 3, компенсатора 2.

¹ А. с. № 601144.

² Разработаны в Хабаровском политехническом институте.

сирующего износ опоры 2, и деформирующего элемента 1 диаметром 4 мм (сталь ШХ15, HRC 60). Такая оправка используется для обработки деталей топливной аппаратуры, посадочных мест подшипников качения в крышках микродвигателей.

На рис. 42, б показана державка с твердосплавными шарами (BK6) диаметром 0,8—0,9 мм для обработки наружных цилиндрических поверхностей деталей малого диаметра (менее 3 мм). Она применяется, например, для обработки валиков диаметром 1,34 мм из алюминия и копея.

Для обработки глухих отверстий можно использовать державку, показанную на рис. 42, в с угловым сепаратором 5, закрепленным на корпусе 6 винтами 4. Фторопластовая опора 3 шара 2 из капролона. Зазор между шаром и сепаратором регулируется винтом 1 для компенсации износа опоры. Державка с автоматической компенсацией износа опор была показана на рис. 41. Деформирующими элементами при вибронакатывании термически необработанных сталей и цветных металлов ($HRC < 40-42$) являются закаленные шары ($HRC 62-65$) из стали ШХ15, ШХ9 и ШХ6 диаметром 1—20 мм.

Для вибронакатывания термически обработанных сталей ($HRC > 45$) используются стандартные алмазные наконечники

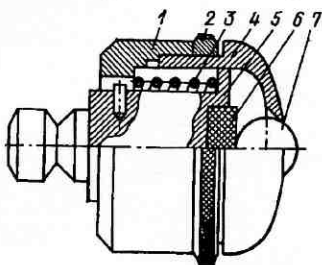


Рис. 41. Шариковая державка с устройством, компенсирующим износ шариковой опоры и сепаратора

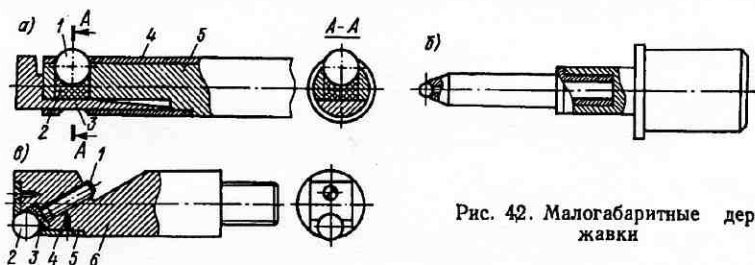


Рис. 42. Малогабаритные державки

(чаще применяются алмазные наконечники¹ с синтетическими алмазами) с радиусами сферы 0,5, 1,0 и 1,5 мм. В отдельных случаях, когда необходимо создать особо качественную в отношении как микрогеометрии, так и физико-механических свойств поверхности, а также при вибронакатывании мало- и неравножестких деталей, используются естественные алмазы. При вибронакатыва-

¹ Серийно выпускаются Томилиским заводом алмазных инструментов.

нии прерывистых поверхностей, сопряженном с ударами, воспринимаемыми деформирующим элементом, при опасности растрескивания алмаза его заменяют твердосплавными наконечниками (ВК6, ВК8). К сожалению, еще не налажен серийный выпуск твердосплавных шаров, испытания которых выявили большие их достоинства и, в частности, возможность обрабатывать термически обработанные стали твердостью $HRC\ 55$ и более.

К деформирующим элементам, применяемым для образования на поверхностях регулярных микрорельефов, следует также

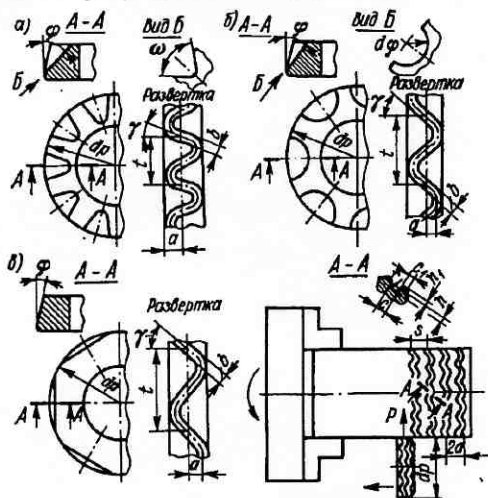


Рис. 43. Виды фасонных накатных роликов со скосами: а — угловыми; б — радиусными; в — плоскими

отнести фасонные ролики [1] и прокатные валки для холодной прокатки листов и лент. На рис. 43 показаны три вида накатных роликов, применяемых при образовании частично регулярного микрорельефа по схеме на рис. 1 [1]. Ролики с угловыми скосами используют для образования канавок с углом $\gamma \leq 30^\circ$, плоскими — для канавок с углом $\gamma > 45^\circ$.

Диаметр ролика при обработке наружных поверхностей определяется возможностью размещения в его отверстии шарикоподшипника, а при обработке отверстия — его диаметром; при этом отношение $\pi d_p/t$ должно быть целым числом.

Ширина b ленточки между скосами зависит от глубины h выдавливаемой канавки и радиуса r кривизны ее дна. Как правило, $b = \sqrt{2hr} - h^2$. Значения h и r задаются конструктором, исходя из результатов экспериментального выявления значений параметров оптимального микрорельефа.

Угол φ определяется из соотношения

$$\operatorname{tg} \varphi = \frac{\operatorname{tg} \gamma}{\operatorname{tg} \frac{\omega}{2}}, \quad (2)$$

где ω — угол профиля фрезы, используемой для образования на ролике скосов.

По данным [1] наиболее приемлемым является значение $\omega = 90^\circ$ (при этом $\operatorname{tg} \varphi = \operatorname{tg} \gamma$, $\gamma \approx 30^\circ$).

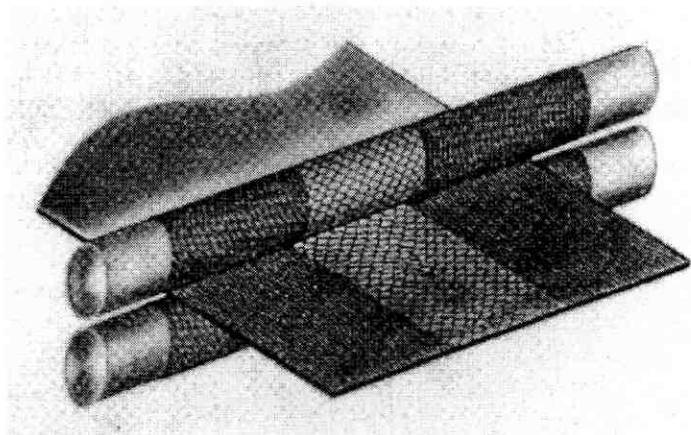


Рис. 44. Схема прокатки листов и лент в вибронакатанных валках

Геометрически угол γ определяется из соотношения (рис. 43)

$$\operatorname{tg} \gamma = \frac{t}{4a}, \quad (3)$$

где t — шаг канавки; a — амплитуда.

Варьируя значением амплитуды a , достигают требуемого значения γ .

Фасонные ролики для обработки деталей твердостью HRC 35—40 изготавливаются из сталей X12M или X12Ф и закаляются до HRC 59—61.

В последнее время освоен разработанный в ЛИТМО способ холодной прокатки листов и лент с регулярным микрорельефом¹. Микрорельеф образуется как негативный отпечаток микрорельефа накатных валков, т. е. при образовании на валках канавок на листах и лентах создается обратный выпуклый микрорельеф (рис. 44).

¹ А. с. № 671887.

Регулярный микрорельеф образуется на прокатных валах с помощью ранее описанных виброголовок. При обработке малогабаритных валков используются универсальные виброголовки (см. рис. 12). При обработке валков большого диаметра и большой длины, в особенности при образовании полностью нового, наиболее трудоемкого микрорельефа, применяются многоэлементные трехшариковые виброголовки (см. рис. 15 и 16). Вид и параметры частично или полностью регулярного микрорельефа выбираются в зависимости от его назначения: 1) улучшение условий процесса прокатки, в частности, за счет выравнивания их по всей длине вала образованием на различных участках микрорельефа различного вида (рис. 44); 2) уменьшение энергоемкости процесса прокатки за счет улучшения захвата заготовки валками; 3) прокатка листов и лент с заданными эксплуатационными свойствами.

4. Классификация регулярных микрорельефов и их особенности

Схема процесса вибронакатывания, предопределяющая его кинематику и возможность варьирования всех параметров режима

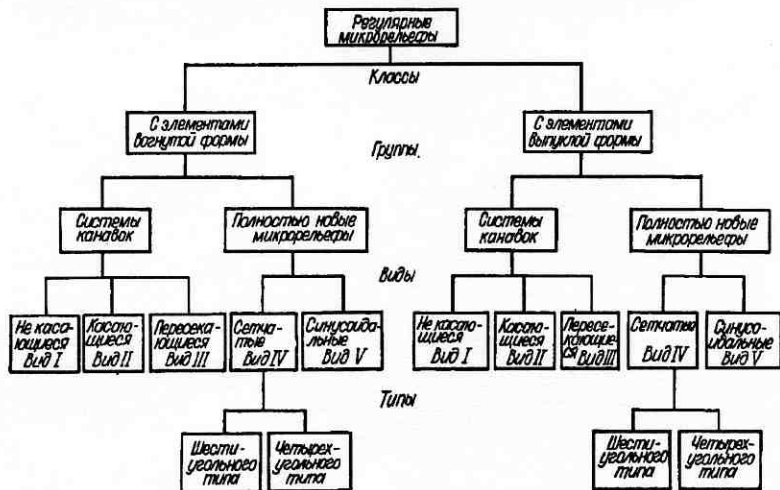


Рис. 45. Классификация регулярных микрорельефов

весьма тонко и в значительных пределах даже при ступенчатом изменении частоты вращения заготовки и подачи деформирующего элемента, обуславливает и возможность варьирования видов создаваемых регулярных микрорельефов и значений всех их параметров. Это определяет необходимость достаточно полной и строгой классификации регулярных микрорельефов. В основу предложенной автором классификации положены целевое назначение, эксплуата-

ционные свойства и способ технологического обеспечения образования микрорельефа того или иного вида.

Классификация, приведенная на рис. 45, расширена по сравнению с рассмотренной в первом издании книги за счет класса выпуклых микрорельефов. Микрорельефы с элементами выпуклой и вогнутой формы (рис. 46) отличаются целевым назначением поверхностей, на которых они образованы, эксплуатационными свойствами этих поверхностей и технологией их образования.

На рис. 46 показаны профилограммы элементов выпуклой и вогнутой формы и внешний вид таких поверхностей. Рассмотрим лишь некоторые особенности выпуклых микрорельефов.

Поверхности первой группы с системами определенным образом расположенных выступов, образованные прокатными валками с системами канавок, подразделяются на три вида: I — с некасающимися выступами; II — с касающимися; III — с пересекающимися.

Граничные условия образования каждого вида микрорельефа и регулирования значений их параметров, а также зависимости между этими значениями и параметрами режима вибронакатывания прокатных валков приведены ниже. Величина радиуса сферической части выступов определяется величиной радиуса деформирующего элемента, образующего канавки на прокатных валках.

Ко второй группе микрорельефов поверхностей с выпуклыми элементами относятся полностью новые регулярные микрорельефы, отличающиеся большой величиной радиуса скругления вершин неровностей (рис. 47), близкой величине радиуса деформирующего элемента, образующего канавки на прокатных валках. Так, при вибронакатывании прокатных валков сферическим алмазным наконечником с радиусом сферы, равным 1,5 мм, образуется полностью новый регулярный выпуклый микрорельеф с радиусом скругления вершин неровностей несколько большим 1500 мкм. При прокатке фольги и мягких пластичных металлов в незакаленных стальных валках, вибронакатанных шарами радиусами 4, 6, 8, 10 мм, создавались регулярные микрорельефы с радиусами скруглений выступов неровностей соответственно приближенно

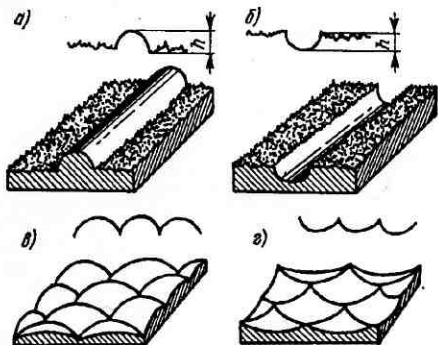


Рис. 46. Профилограммы и внешний вид элементов: а — выпуклой и вогнутой формы; б — вид элементов в сечении; в — профилограммы поверхностей с элементами выпуклой и вогнутой формы; г — вид поверхностей с элементами выпуклой и вогнутой формы в плане

равными 4000, 6000, 8000 и 10 000 мкм. Практически никогда еще ни одним известным способом такие микрорельефы не создавались. В зависимости от микрорельефа валков полностью новые микрорельефы подразделяются на сетчатые и синусоидальные. Сетчатые микрорельефы могут быть шести- и четырехугольные (рис. 47, в).

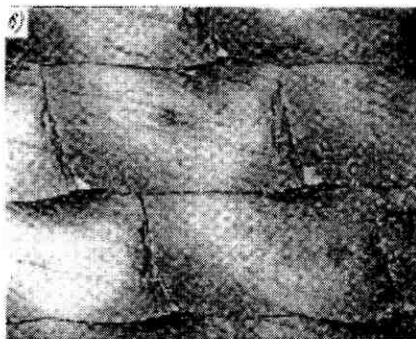
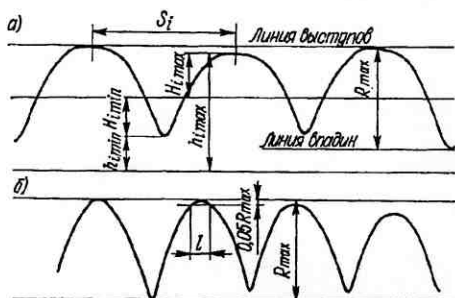


Рис. 47. Профилграмма поверхности с регулярным выпуклым микрорельефом холоднокатанного листа в направлении: а — продольном; б — поперечном (вертикальное увеличение $2000\times$, горизонтальное — $80\times$); в — вид поверхности с четырехугольным выпуклым микрорельефом

Другие особенности, достоинства и эксплуатационные свойства выпуклых микрорельефов приведены в гл. III. Классификация поверхностей с элементами вогнутой формы (рис. 45) по группам, видам и типам идентична классификации поверхностей с выпуклыми элементами.

Регулярные микрорельефы подразделяются на две группы (рис. 48): 1) с системой регулярно расположенных канавок, между которыми остаются участки исходной поверхности (рис. 48, а—в); 2) полностью новый регулярный микрорельеф (рис. 48, г, д).

На рис. 48 показан полностью новый сетчатый микрорельеф вида IV двух типов: шестиугольный (рис. 48, г) и четырехугольный (рис. 48, д).

На рис. 49 приведена схема образования на внутренней цилиндрической поверхности микрорельефов различных видов. Она иллюстрирует принцип управления образованием регулярных микрорельефов варьированием режима процесса вибронакатывания.

Поверхности с системой канавок подразделяются на три основных вида:

- 1) с системой непересекающихся канавок (вид I);
- 2) с системой касающихся канавок (вид II);
- 3) с системой пересекающихся канавок (вид III).

Поверхности с системой канавок подразделяются на три основных вида:

- 1) с системой непересекающихся канавок (вид I);
- 2) с системой касающихся канавок (вид II);
- 3) с системой пересекающихся канавок (вид III).

Аналитические зависимости условий образования микрорельефов с системами канавок различных видов, выведенные Я. С. Фельдманом, определяют границы каждого вида.

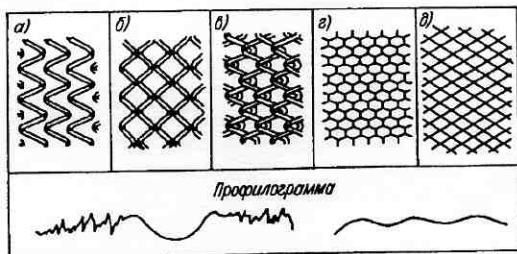


Рис. 48. Схемы и профилограммы поверхностей с системами канавок и с полностью новым регулярным микрорельефом

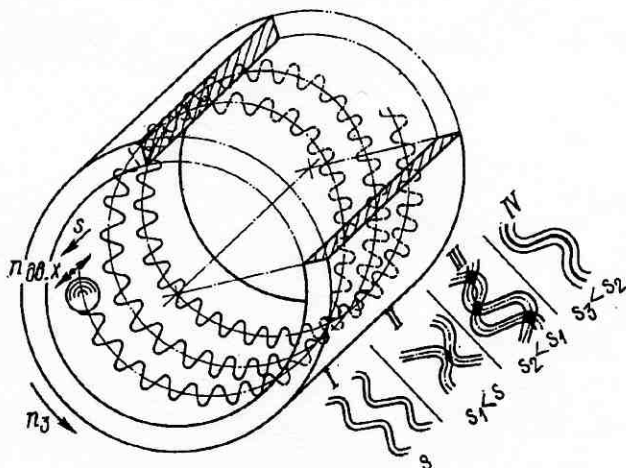


Рис. 49. Схема образования регулярных микрорельефов различных видов

Условие образования микрорельефа вида I с системой непересекающихся канавок:

$$s > 2(\rho + e \sin \pi \{i\}), \quad (4)$$

где s — подача инструмента; ρ — половина ширины единичной канавки, образуемой инструментом; e — эксцентриситет; $\{i\}$ — дробная часть отношения числа двойных ходов инструмента к частоте вращения обрабатываемой заготовки.

Условия образования микрорельефа вида II с касающимися канавками:

$$\left. \begin{aligned} 2(\rho - e \sin \pi \{i\}) < s < 2(\rho + e \sin \pi \{i\}), \\ s > 2e \sin \pi \{i\}. \end{aligned} \right\} \quad (5)$$

Условия образования микрорельефа вида III с системой пересекающихся канавок:

$$\left. \begin{aligned} 0 < s < 2e \sin \pi \{i\}; \\ s > 2(s + e \sin \pi \{i\}). \end{aligned} \right\} \quad (6)$$

С увеличением ширины канавки и уменьшением подачи s большая часть исходной поверхности будет перекрываться новым микрорельефом. При выполнении первого условия $s < 2\rho (1 - |\{i\}|)$ на поверхности образуется полностью новый регулярный микрорельеф.

Поверхности с системой канавок, методы и средства их измерения достаточно хорошо изучены и освещены в работе [15]. Рассмотрим условия образования полностью нового регулярного микрорельефа. Эти условия исследовались Р. У. Назировым, Б. Н. Букиным, В. А. Забродиным, Ю. П. Кузьминым и В. И. Сорокиным [11].

Поверхности с полностью новым регулярным микрорельефом в зависимости от того, пересекаются ли линии центров образующих его канавок или нет, можно подразделить на два типа микрорельефов: синусоидальный и сетчатый.

При синусоидальном микрорельефе линии центров образующих его канавок не пересекаются, однако канавки при последовательном наложении друг на друга образуют полностью новый микрорельеф.

В том случае, когда линии центров канавок, образующих регулярный микрорельеф, пересекаются, выполняется второе условие

$$s < 2e \sin \pi \{i\}, \quad (7)$$

и накладываемые друг на друга канавки перекрывают всю обрабатываемую поверхность заготовки, образуется сетчатый микрорельеф, каждый элемент ¹ которого имеет форму, близкую к шестиугольной или четырехугольной (рис. 48). Поскольку, как видно из рис. 50, область образования синусоидального микрорельефа весьма мала и сам микрорельеф относительно мало изучен, в дальнейшем будем рассматривать лишь сетчатый, полностью новый регулярный микрорельеф.

Рассмотрим условия образования различных типов регулярного микрорельефа сетчатого вида ² при следующих принятых ограничительных условиях: 1) радиус сферы деформирующего элемента

¹ Под элементом регулярного микрорельефа подразумевается элементарный участок сетчатого регулярного микрорельефа.

² По результатам работ Ю. П. Кузьмина.

значительно меньше радиуса заготовки; 2) амплитуда осцилляции деформирующего элемента равна величине эксцентриситета приводного эксцентрика осцилляционного движения; 3) границы выдавливаемых канавок, формирующих элемент регулярного микрорельефа в синусоидальном виде

$$y_n = e \sin \left(\frac{2\pi t}{T_{\text{дв. х}}} + 2\pi n \{i\} \right) + n_3 s, \quad (8)$$

где $T_{\text{дв. х}}$ — период осцилляции деформирующего элемента; n_3 — частота вращения заготовки; s — подача; e — эксцентриситет

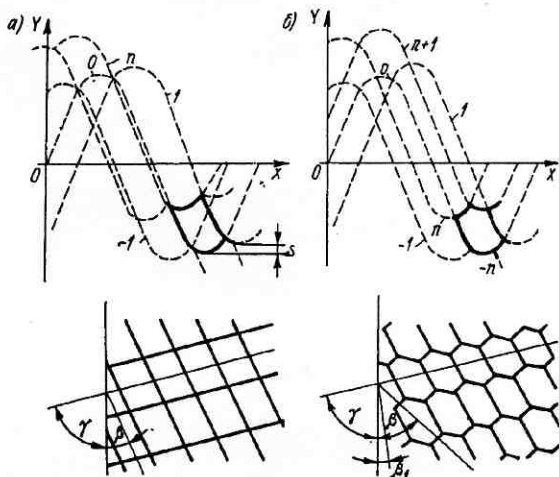


Рис. 50. Схемы формирования сетчатого микрорельефа

приводного эксцентрика осцилляционного движения деформирующего элемента; $\{i\}$ — дробная часть отношения $n_{\text{дв. х}}/n_3$; $n_{\text{дв. х}}$ — частота осцилляции деформирующего элемента.

Схематическое изображение механизма формирования сетчатых микрорельефов четырехугольного и шестиугольного типов приведено на рис. 50. За исходную канавку нулевого индекса принимаем канавку, проходящую через начало координат. Канавки, расположенные выше нулевой, имеют положительные индексы, ниже — отрицательные. Элемент регулярного микрорельефа, впадина которого образована частью канавки нулевого индекса, ограничен шестью гранями, образующимися при пересечении канавки нулевого индекса с канавками $(-n-1)$ -го, $(-n)$ -го, (-1) -го, 1-го, 1-го, n -го и $(n-1)$ -го индексов. В точках пересечения формирующих граней с этими индексами образуются выступы — максимальные по высоте неровности элементов регулярного микрорельефа шестиугольного типа (рис. 50, б). Четырехугольный тип

(рис. 50, а) регулярного микрорельефа можно рассматривать как частный случай шестиугольного, образующийся в том случае, когда формирование элемента регулярного микрорельефа завершается одной канавкой n -го индекса.

Таким образом, если класс регулярного микрорельефа определяется технологией его образования, то группа, вид и тип — режимом процесса вибронакатывания. На рис. 51 графически представлены граничные условия создания регулярных микрорельефов различных групп и видов.

Особенности регулярных микрорельефов. Основные недостатки традиционных способов финишной обработки деталей машин и

приборов, определившие создание нового направления в данной области — регуляризацию микрорельефов поверхностей, сводятся к следующему:

1) высокая степень неоднородности (нерегулярность) образующихся микрорельефов в отношении формы, размеров и взаиморасположения неровностей (по-видимому, именно это предопределило термин «шероховатость поверхности»);

2) в большинстве случаев, неблагоприятная форма образующихся неровностей шероховатых

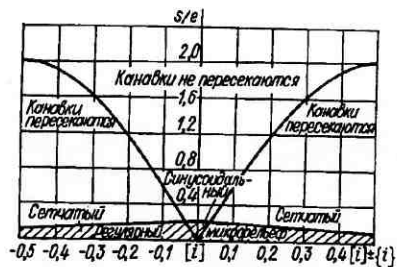


Рис. 51. Граничные условия образования различных видов регулярного микрорельефа

поверхностей: заостренные выступы и впадины с малыми значениями радиусов r (выступов) и r' (впадин) и относительно большой величиной угла наклона β их образующих;

3) относительно малая несущая способность поверхностей, обусловленная заостренной формой неровностей, и соответственно малая опорная поверхность при начальных сближениях контактирующих поверхностей в процессе их приработки и большой приработочный износ;

4) чрезмерно большая фактическая площадь высокоточных высокогладких поверхностей (выше 10-го класса) и малая их маслоемкость;

5) ограниченные возможности управления образованием поверхностей с различным соотношением высоты, формы и расположения неровностей поверхности;

6) шаржирование в поверхностный слой абразивных частиц при абразивной обработке.

Перечисленные недостатки большинства способов финишной обработки резанием и давлением затрудняют, а в ряде случаев делают невозможным решение следующих важных, связанных с обеспечением требуемого качества машин и приборов, задач:

1) оптимизация микрорельефа рабочих поверхностей деталей машин и приборов для различных, непрерывно расширяющихся и усложняющихся условий их эксплуатации;

2) оптимизация микрорельефа за счет нормирования и технологического обеспечения более широкого комплекса пока не стандартизированных параметров качества поверхности;

3) применение расчетных методов нормирования и технологического обеспечения геометрических характеристик качества поверхности;

4) безаппаратный контроль микрогеометрии поверхностей;

5) исследование и выявление зависимостей между различными геометрическими параметрами качества поверхности и их эксплуатационными свойствами.

Важность и актуальность этих задач определяют поиск и выполнение широкого фронта работ по совершенствованию способов финишной обработки деталей машин и приборов во всех передовых промышленных странах, создание принципиально новых отделочно-упрочняющих операций, образующих поверхности с микрогеометрией, свободной от перечисленных недостатков. В частности, при патентовании способа вибронакатывания выявилось, что во всех передовых промышленных странах ведутся работы, связанные с регуляризацией микрорельефов поверхностей деталей машин и приборов. Выданные в США, ФРГ, Англии, Франции патенты¹ на способ вибронакатывания и создаваемые им частично и полностью регулярные микрорельефы определяют принципиально новое решение задачи регуляризации; эффективность его широкого применения на многих предприятиях Советского Союза и на некоторых заводах за рубежом свидетельствует о важных достоинствах и перспективности.

В какой же мере новый способ обработки позволяет исключить перечисленные выше недостатки микрогеометрии шероховатых поверхностей? Это видно из приводимых ниже следующих особенностей регулярных микрорельефов, создаваемых способом вибрационного накатывания.

1. Микрорельеф вибронакатанной поверхности образуется как след движения участка деформирующего элемента, контактирующего с обрабатываемой поверхностью. Поскольку этот след фактически полностью определяется кинематикой движения деформирующего элемента, пластически деформирующего хаотично расположенные неровности исходной поверхности заготовки, создается новый регулярный микрорельеф со строго закономерно расположенными относительно друг друга неровностями одинаковой формы и размеров (см. рис. 47).

2. Благоприятная практически для всех условий эксплуатации форма неровностей регулярных микрорельефов, характеризующаяся пологой формой выступов и впадин с радиусами на 1—2 порядка

¹ Патенты выданы на имя автора.

большими, чем при обработке резанием, и соответственно большей величиной опорной поверхности как исходной после вибронакатывания, так и в приработочный период (см. рис. 46 и 47).

3. Усложненная кинематика процесса вибронакатывания и большое число регулируемых параметров его режима (см. рис. 2) позволяют весьма тонко и в больших пределах варьировать значения большого числа параметров создаваемого регулярного микро-рельефа, в том числе таких информативных, но пока еще не стандартизованных параметров, как число выступов и впадин на единице площади, фактическая площадь поверхности и длина профиля, радиусы закругления выступов и впадин и др.

4. Возможность независимого регулирования параметров режима вибронакатывания и отсутствие «жесткой» их связи с параметрами регулярного микро-рельефа позволяют управлять формой и взаиморасположением его элементов. Отсутствие характерной для обработки резанием связи между подачей s , высотой R образующихся неровностей и их шагом S и направлением ($R = s^2/8r$, где r — радиус вершины резца) позволяет создавать поверхности с одинаковой высотой неровностей, с различным их шагом и направлением.

5. На основе особенностей (п. 3 и 4) возможно управлять такими параметрами поверхности, а следовательно, и контакта поверхностей, как фактическая ее площадь и фактическая площадь контакта, и создавать высокочистые поверхности достаточной маслостойкости, исключать явления молекулярного сцепления, адгезии, фреттинг-коррозии.

6. Строгая кинематическая связь между параметрами режима процесса вибронакатывания и параметрами регулярного микро-рельефа определяет возможность расчетного нормирования, технологического обеспечения и безаппаратного контроля поверхностей с регулярным микро-рельефом.

7. На основе п. 3—6 становится возможным стандартизация регулярных микро-рельефов с включением в число стандартизуемых параметров, как относительная опорная площадь элемента поверхности и их число на единицу площади. Если учесть, что контакт поверхностей всегда происходит по площадкам, а площадь фактического контакта — важнейший параметр, определяющий все его служебные свойства, то станет очевидным прогрессивность и перспективность нового стандарта и всего направления регуляризации микрогеометрии поверхностей деталей машин и приборов. Впервые в стандарт включены не усредненные (как в ГОСТ 2789—73) значения параметров микро-рельефа, а их абсолютные значения, практически одинаковые для всей поверхности.

8. Универсальность и возможность управления фактически всеми параметрами и характеристиками поверхностей с регулярным микро-рельефом (п. 1—7) характеризуют способ вибронакатывания как инструмент для исследования и выявления взаимосвязей огромного многообразия эксплуатационных свойств поверхностей

с их микрогеометрией — важнейшей научно-технической и народнохозяйственной задачей, от решения которой зависят совершенствование машин и приборов, их качество и надежность.

9. Поскольку в основе способа вибронакатывания в отношении воздействия на обрабатываемый материал лежит холодная пластическая деформация со свойственными ей особенностями и достоинствами, все они могут быть распространены и на этот процесс и на физико-механические свойства образуемого им поверхностного слоя материала. Отсутствие перерезания волокон металла, незначительный нагрев его поверхностного слоя, упрочнение за счет наклепа и сжимающих напряжений, отсутствие шаржирования в поверхностный слой инородных частиц — все эти позитивные свойства характерны для вибронакатанных поверхностей.

10. Сложная кинематика процесса вибронакатывания определяет и его интенсификацию в отношении упрочнения; степень упрочнения при прочих равных условиях по сравнению с вдавливанием деформирующего элемента в неподвижную и во вращающуюся заготовку (при вибронакатывании наибольшая), что весьма важно при обработке мало- и неравножестких деталей, «не выносящих» приложения значительных давлений.

Таким образом, при создании регулярных микрорельефов оптимизация качества поверхности деталей возможна как за счет геометрических, так и физических параметров. Анализ сущности и особенностей регулярных микрорельефов свидетельствует о том, что практически все недостатки, свойственные шероховатым поверхностям деталей машин и приборов, в этом случае исключены. Именно эти особенности и достоинства позволяют успешно решить шесть перечисленных выше задач, определяющих совершенствование нормирования микрогеометрии конструктором, технологического ее обеспечения технологом, переход в том и другом случае на расчетные методы, переход на безаппаратный контроль микрогеометрии, на новый уровень ее стандартизации.

5. Стандартизация регулярных микрорельефов

Стандартизация в области микрогеометрии поверхностей в Советском Союзе начата сравнительно недавно — в 1940 г. созданием ОСТ 75—40. Позднее, в 1945, 1951, 1959 и в 1973 гг. были разработаны непрерывно совершенствовавшиеся стандарты за одним и тем же номером ГОСТ 2789. По-видимому, история стандартизации не знала случая, когда стандарт, в сферу действия которого вовлечено огромное число специалистов — исследователей, конструкторов, технологов, производственников, столь часто перерабатывался, несмотря на то, что это было связано с необходимостью выполнения большого числа исследований, изменения огромного числа технических документов, создания новой измерительной аппаратуры. Такое же положение имело место во всех передовых промышленных странах и обусловлено оно не только важностью и

актуальностью проблемы качества поверхности, но и необходимостью непрерывного совершенствования стандартов в соответствии с повышающимися к ним требованиями промышленности. За сорок лет стандарт на шероховатость поверхности перерабатывался пять раз, причем особо радикально в последний раз, когда в дополнение к трем высотным параметрам шероховатости поверхности в ГОСТ 2789—73 были включены шаговые параметры S и Sm и относительная опорная длина профиля tp . Несмотря на столь существенную модернизацию, действующий в настоящее время стандарт далек от совершенства.

Основные недостатки ГОСТ 2789—73:

1) наличие трех высотных и двух шаговых параметров шероховатости поверхности, что усложняет пользование стандартом;

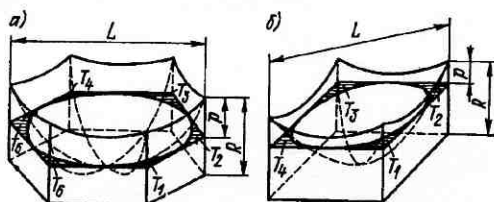


Рис. 52. Элементы поверхностей с регулярным микрорельефом: а — шестиугольного вида; б — четырехугольного вида

2) четыре из шести параметров (Ra , Rz , S и Sm) представлены как средние значения высоты и шага, что снижает точность нормирования шероховатости поверхности, затрудняет контроль;

3) шероховатость поверхности и все ее параметры рассматриваются в сечении, отсутствуют площадные параметры, наиболее полно определяющие связь шероховатости поверхности с важнейшими эксплуатационными ее свойствами;

4) отсутствует весьма информативный параметр — число неровностей на единице площади поверхности;

5) стандарт предопределяет лишь аппаратный контроль шероховатости поверхности.

Большинство этих недостатков определяются органическим несовершенством самих нерегулярных микрорельефов шероховатых поверхностей.

Поскольку действующий стандарт и стандарт на регулярные микрорельефы относятся к одной и той же области науки и техники — метрологии микрогеометрии поверхностей, в основу разработки нового стандарта был положен принцип преемственности. Однако многие аспекты стандарта на регулярные микрорельефы получили совершенно новую трактовку и определения. Так, термин «шероховатость поверхности», заменен термином «регулярный микрорельеф» (по-видимому, в дальнейшем можно будет

отказаться в этом термине от слова «регулярный»). Наиболее существенные изменения по сравнению с ГОСТ 2789—73 в новом стандарте претерпел раздел «Параметры и характеристики поверхностей с регулярным микрорельефом».

В номенклатуру параметров и характеристик включены:

1) R — высота элемента регулярного микрорельефа (рис. 52), поскольку высота элементов по всей поверхности практически одинакова;

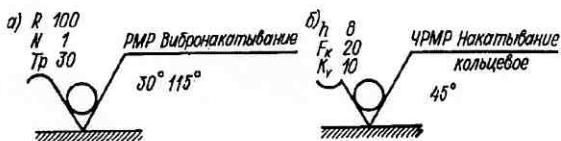


Рис. 53. Структура обозначения поверхностей с регулярным и частично регулярным микрорельефом

2) N — число элементов регулярного микрорельефа на единицу площади, поскольку оно является функцией режима процесса вибронакатывания и рассчитывается аналитически;

3) Tr — относительная опорная площадь (рис. 52) поверхности с регулярным микрорельефом, поскольку она является функцией режима процесса вибронакатывания и рассчитывается аналитически для заданного уровня сечения поверхности p ;

4) γ , β — углы направления расположения элемента (см. рис. 50), поскольку их значения являются функцией режима процесса вибронакатывания и рассчитываются аналитически.

В стандарте «узаконена» классификация регулярных микрорельефов, приведенная на рис. 45¹.

В номенклатуру параметров и характеристик частично регулярных микрорельефов включены; h — глубина (высота) регулярно расположенных углублений (выступов; см. рис. 46); F_k — относительная площадь поверхности, занимаемая углублениями (выступами); α — угол направления неровностей.

Таким образом, пять рассмотренных выше основных недостатков ГОСТ 2789—73, определяющих необходимость дальнейшей его переработки, в стандарте на регулярные микрорельефы отсутствуют.



Рис. 54. Товарный знак поверхности с регулярным микрорельефом

¹ По рекомендации Комитета стандартов в ГОСТ 24773—81 включены не только регулярные, но и частично регулярные микрорельефы.

Стандарт распространяется на регулярные микрорельефы поверхностей изделий, изготовленных из таких материалов и такими способами, которые обеспечивают следующие пределы числовых значений их параметров: $R = 1600 \div 0,025$ мкм; $N = 0,01 \div 100$ на 1 мм^2 ; $Tr = 5 \div 90$ %; $\beta = 5 \div 180^\circ$.

Для частично регулярных микрорельефов установлены следующие пределы числовых значений их параметров: $h = 0,5 \div 100$ мкм; $F_k = 5 \div 90$ %; $\alpha = 5 \div 90^\circ$.

Структура обозначения поверхностей с регулярным микрорельефом приведена на рис. 53, а, а с частично регулярным микрорельефом на рис. 53, б¹. На рис. 54 приведен утвержденный Комитетом по делам изобретений и открытий при Совете Министров СССР торговый знак поверхности с регулярным микрорельефом².

¹ В ГОСТ 24773—81 термин «регулярный микрорельеф» обозначен сокращенно РМР, а «частично регулярный» — ЧРМР.

² РМР — регулярный микрорельеф.

ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ
ОСНОВЫ
ОБРАЗОВАНИЯ
РЕГУЛЯРНЫХ
МИКРОРЕЛЬЕФОВ

6. Основные кинематические и динамические зависимости образования регулярных микрорельефов

Образование регулярного микрорельефа вибрационным накатыванием, виброударным и динамическим вибронакатыванием имеет следующие целевые назначения:

- 1) чистовая (финишная) обработка, обеспечивающая образование оптимального для различных условий эксплуатации микрорельефа поверхности;
- 2) упрочняющая обработка, повышающая усталостную прочность, контактную жесткость и износостойкость;
- 3) восстановление размера с сохранением исходной точности;
- 4) декоративная обработка с образованием заданного регулярного рисунка или фактуры поверхности.

Эти целевые назначения могут сочетаться. Так, практически во всех случаях оптимизация микрорельефа сочетается с упрочнением поверхностного слоя металла, причем упрочнение может внести существенный вклад в улучшение эксплуатационных свойств детали, например в повышение износостойкости — до 30—40 %. В отдельных случаях наклеп недопустим или должен быть минимальным, например при работе поверхностей в условиях воздействия веществ, вызывающих коррозию, при обработке монокристаллов, так как наклеп снижает коррозионную прочность и может нарушить монокристалличность. Такое же сочетание образования регулярного микрорельефа с упрочнением имеет место, когда оно является основным целевым назначением одного из процессов, в основе которых лежит пластическое деформирование металла в холодном состоянии. Упрочнение неизбежно сопровождается и восстановлением размеров и декоративную обработку при образовании как регулярного, так и частично регулярного микрорельефов.

Чтобы управлять этими процессами для выполнения ими тех или иных целевых назначений, необходимо знать основные кинематические и динамические зависимости параметров их режима с параметрами создаваемой микрогеометрии и физико-механическими свойствами образуемого поверхностного слоя. Поскольку

в настоящее время процесс вибронакатывания оказался основным и наиболее широко используемым для образования регулярных микрорельефов, основные кинематические и динамические зависимости параметров его режима с параметрами качества обрабатываемых поверхностей рассмотрены именно в этом аспекте.

В зависимости от целевого назначения и требований конструктора необходимо создавать на поверхности регулярный микрорельеф того или иного класса, группы, вида, типа с различными

Параметры режима	Геометрические характеристики микрорельефа					Параметры канавок		
	Rz	r	β	$\frac{r}{Rz_{max}}$	F_{on}	h	S	V
ρ								
$d_{ш}$								
$n_{\beta\beta.x}$								
n_{β}								
s								
l								

Рис. 55. Типовые зависимости геометрических параметров качества поверхности от параметров режима вибронакатывания

значениями его параметров. Это достигается за счет управления процессом вибронакатывания (или другим процессом) варьированием значений параметров его режима.

Сложность кинематики процесса вибронакатывания и большое число регулируемых параметров режима облегчает решение этой задачи, обеспечивая возможность в больших пределах варьировать их сочетание по номенклатуре и численным значениям. Эта же особенность вибронакатывания позволяет более полно выполнять требования конструктора к микрогеометрии поверхности за счет расширения номенклатуры нормируемых параметров, в том числе и пока еще не стандартизированных. На рис. 55 приведены типовые графики зависимости геометрических параметров качества поверхности от параметров режима вибронакатывания. Большое число регулируемых параметров режима вибронакатывания и параметров регулярных микрорельефов, с одной стороны, облегчает задачу оптимизации микрогеометрии поверхностей, с другой — существенно усложняет технологическое обеспечение заданного конструктором регулярного микрорельефа. Ниже приведены ре-

зультаты многолетних теоретических и экспериментальных исследований, на основе которых созданы методики нормирования конструктором и технологического обеспечения технологом образования регулярных микрорельефов с заданным комплексом параметров и численными их значениями.

Кинематические зависимости. Кинематические зависимости, характеризующие процесс вибронакатывания, значительно многообразнее и сложнее, чем при обкатывании шарами и роликами [16, 17], а также при точении и шлифовании, фрезеровании, протягивании. Как видно из схемы вибронакатывания поверхностей различной формы (см. рис. 3—6, 39, б), параметрами режима, определяющими кинематику процесса и все параметры регулярного микрорельефа, являются: частота вращения заготовки (n_a), подача деформирующего элемента или заготовки (s), частота осцилляции деформирующего элемента ($n_{дв. х}$) и амплитуда осцилляции деформирующего элемента (e). Сущность управления образованием регулярных микрорельефов состоит в том, что оно производится за счет варьирования соотношения скоростей движения заготовки и деформирующего элемента. Этот новый принцип управления образованием микрорельефа поверхностей защищен основным авторским свидетельством¹ и выданными зарубежными странами патентами.

Соотношение скоростей движения заготовки и деформирующего элемента определяет образование регулярного или частично регулярного микрорельефа того или иного класса, группы, вида, типа и все значения всех их параметров, а также степени перекрытия выдавливаемыми канавками исходной поверхности. Степень перекрытия $K_{п}$ ² определяет путь, проходящий деформирующим элементом в единицу времени относительно обрабатываемой поверхности, т. е. скорость относительного перемещения заготовки и деформирующего элемента, и зависит от значений кинематических параметров режима вибронакатывания. Однако степень перекрытия зависит не только от скорости движения деформирующего элемента относительно заготовки, но и от ширины выдавливаемой им канавки. Ширина канавки, в свою очередь, зависит от динамических параметров режима — усилия вибронакатывания P и диаметра шара $d_{ш}$.

Таким образом, степень перекрытия, определяющая производительность обработки и характер микрорельефа, зависит от всех параметров режима вибронакатывания. Качественные зависимости между степенью перекрытия и параметрами режима таковы: при данном диаметре заготовки степень перекрытия тем больше, чем больше число осцилляций, амплитуда колебания деформирующего

¹ А. с. № 135095.

² Под степенью перекрытия понимается не только площадь, занимаемая канавками (в процентах от номинальной площади обрабатываемой поверхности), но и площадь перекрытия одной канавки другой для вибронакатанных поверхностей вида II, III и IV.

элемента, усилие вибронакатывания и диаметр шара (или радиус сферы алмаза) и чем меньше частота вращения заготовки и подача деформирующего элемента. Эту зависимость можно выразить формулой

$$K_{II} = \frac{n_{дв. х} \cdot K \cdot P \cdot d_{III}}{n_3 \cdot s} = i \frac{e \cdot P \cdot d_{III}}{s}. \quad (8')$$

Если учесть, что изменение ширины канавки за счет варьирования значений P и d_{III} возможно лишь в небольших пределах, так как увеличение P и d_{III} ограничено жесткостью обрабатываемых заготовок, опасностью перенаклепа, необходимостью в большинстве случаев выдавливания канавок небольшой глубины, то основными параметрами режима вибронакатывания, определяющими возможности регулирования степени перекрытия, будут n_3 , s , $n_{дв. х}$ и e .

Каковы возможности регулирования степени перекрытия и других параметров регулярного микрорельефа за счет варьирования численных значений каждого из этих параметров режима?

Частота вращения заготовки. Частота вращения заготовки в минуту n_3 определяет количество волн выдавливаемых канавок, приходящихся за один оборот заготовки, и величину смещения канавок относительно друг друга в направлении вращения заготовки, а при определенных значениях других параметров режима вибронакатывания — группу, вид и тип микрорельефа (см. рис. 50—52). Как видно из рис. 51, граничные условия образования частично регулярного и регулярного микрорельефов различных видов и типов определяются соотношением $i = n_{дв. х} / n_3$. Поскольку у большинства универсальных виброголовок привод осцилляционного движения деформирующего элемента осуществляется от электродвигателей переменного тока, значение $n_{дв. х}$ — величина постоянная, значение i может меняться только за счет изменения n_3 . Токарные станки, наиболее широко использующиеся для вибронакатывания цилиндрических поверхностей, обеспечивают возможность за счет коробок скоростей изменения частоты вращения заготовки в пределах, достаточных для образования всех четырех видов регулярных микрорельефов (то же относится к фрезерным и расточным станкам). Однако в ряде случаев перепады значений частоты вращения шпинделя токарных и других станков оказываются столь большими, что не удается подобрать расчетное соотношение $n_{дв. х} / n_3$ для образования микрорельефа требуемой группы, вида и типа, с заданными значениями параметров. Выбор режима в этих случаях осуществляется перебором вариантов отношения значений параметров режима вибронакатывания n_3 , s , e при данном значении $n_{дв. х}$, как показано ниже в методике определения режима вибронакатывания (см. п. 8). Это довольно сложно и громоздко, поэтому одно из направлений совершенствования виброголовок при создании специальных устройств и станков должно быть обеспечено бесступенчатым регулированием $n_{дв. х}$ деформирующего элемента методами, описанными в гл. I.

Частота осцилляции деформирующего элемента. Недостатки наиболее широко применяемых в настоящее время в промышленной практике виброголовок в отношении регулирования частоты осцилляции деформирующего элемента рассмотрены ранее. Применение более совершенных виброголовок с приводным двигателем постоянного тока с обеспечением бесступенчатого регулирования частоты осцилляции в единицу времени, а также виброголовок с приводом осцилляционного движения электромагнитного и пневматического действия связано с трудностями фиксации фактической частоты осцилляции. Отсутствуют также данные о необходимой точности фиксации, поскольку до

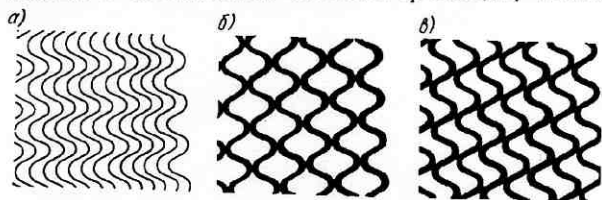


Рис. 56. Взаиморасположение канавок в зависимости от значений числа $\{i\}$

сих пор конструкторы практически во всех случаях нормируют лишь номинальные численные значения параметров как шероховатости поверхности, так и регулярных микрорельефов. Исследования в этой области проводятся в настоящее время в ЛИТМО; их результаты станут основой системы допусков на отклонения значений параметров регулярных микрорельефов.

Отношение частоты осцилляции деформирующего инструмента к частоте вращения заготовки. Отношение $n_{дв. х}/n_з = i$ является основным параметром, определяющим характер взаиморасположения выдавливаемых канавок в направлении вращения заготовки. Целая часть численного значения показывает, сколько раз длина волны λ (см. рис. 4) укладывается на длине окружности заготовки, а дробная $\{i\}$ — величину смещения канавок относительно друг друга при каждом последующем ее обороте

$$\lambda = v_з T; \quad (9)$$

$$v_з = \pi d_з n_з; \quad T = \frac{1}{n_{дв. х}}, \quad (10)$$

где $v_з$ — частота вращения заготовки; T — период осцилляции деформирующего элемента. Тогда

$$\lambda = \pi d_з \frac{n_з}{n_{дв. х}} \text{ мм.} \quad (11)$$

На рис. 56 приведены схемы взаиморасположения канавок в зависимости от значений i . При i , равном целому числу ($\{i\} = 0$), смещение канавок отсутствует (рис. 56, а). Если $\{i\} = 0,5$,

канавки смещаются при каждом последующем обороте заготовки на половину длины волны λ (рис. 56, б). При $0,5 > \{i\} > 0$ канавки располагаются по схеме рис. 56, в. Как показали многочисленные исследования, испытания и эксплуатация различных

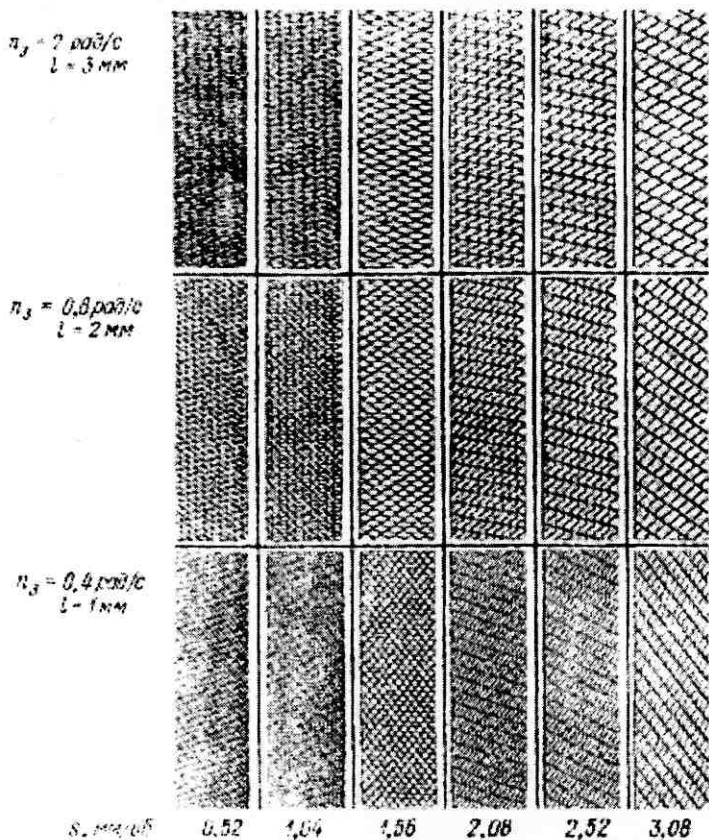


Рис. 57. Вид частично регулярного микрорельефа и взаиморасположение канавок вибронакатанной поверхности в зависимости от подачи, амплитуды осцилляции деформирующего элемента при различных значениях частоты вращения заготовки ($d_3 = 50 \text{ мм}$, $n_{\text{дв. х}} = 1440 \text{ 1/мин}$)

деталей, наиболее благоприятное в отношении служебных свойств, а также расчета и управления микрорельефом взаиморасположение канавок соответствует целым значениям i при отсутствии смещения канавок относительно друг друга.

Подача деформирующего элемента и амплитуда его осцилляции. Величина подачи s определяет расстояние между канавками в направлении подачи,

а отношение подачи к амплитуде (см. рис. 4) — вид микрорельефа. На рис. 57 приведены записи траектории движения деформирующего элемента при различных сочетаниях значений подачи, амплитуды осцилляции и частоты вращения заготовки. Во всех случаях с увеличением подачи степень перекрытия канавками обрабатываемой поверхности уменьшается, а с увеличением амплитуды осцилляции — возрастает.

Помимо подобного рода качественных зависимостей, между режимом процесса вибронакатывания и группой, видом, типом регулярного микрорельефа и его параметрами, включенными в стандарт, могут быть получены и количественные зависимости, в большинстве своем, аналитические. Это обусловлено функциональной связью параметров режима вибронакатывания с параметрами создаваемого регулярного микрорельефа и высокой степенью регулярности микрорельефа, образуемого способом, в основе которого лежит однородная по природе своей пластическая деформация.

Ниже приведены методики расчета геометрических параметров частично регулярных и регулярных микрорельефов, включенных в стандарт, на основе кинематических связей процессов образования регулярных микрорельефов: относительная площадь поверхности F_k , угол сетки α , число элементов на единицу площади N , относительная опорная площадь Tr , углы направления расположения элемента γ , β .

Определение высотных параметров (глубина неровностей h и высота элемента регулярного микрорельефа) рассмотрено в следующем параграфе данной главы, поскольку довлеющими в этом случае являются не кинематические, а динамические зависимости процессов, создающих регулярные микрорельефы.

Расчет относительной площади поверхности (F_k). Этот параметр частично регулярного микрорельефа наиболее полно определяет практически все эксплуатационные свойства поверхностей и, в первую очередь, фактическую площадь контакта поверхности твердого тела с другой поверхностью или с фазой (газ, жидкость), маслосъемность поверхности, способность удерживать от выноса на поверхность контакта инородные частицы и т. д.

Из различных математических моделей и подходов к расчету F_k наибольшее использование получила модель Я. С. Фельдмана, предусматривающая следующие допущения:

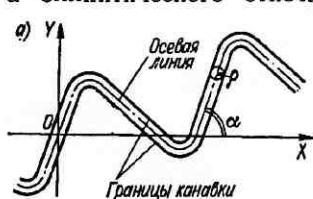
1) образующиеся по краям выдавленной канавки наплывы высотой h_n (рис. 58, б) не учитываются, а глубина h канавки принимается одинаковой во всех ее сечениях при данном режиме вибронакатывания;

2) искажение формы и размеров канавки (рис. 58, б), связанные с упругим последствием обрабатываемого металла ($h_{упр}$), принимаются пренебрежимо малыми;

3) при вдавливании деформирующего элемента в цилиндрическую поверхность образуется отпечаток, граница которого на плоскости развертки имеет вид кривой, близкой к окружности с радиусом ρ (рис. 58, а), определяемым по формуле

$$\rho = \sqrt{d_{\text{ш}} h}. \quad (12)$$

Методика более точного расчета на базе не кругового, а эллиптического отпечатка приведена в п. 8.



Поскольку вывод формул для расчета F_k для частично регулярных микрорельефов всех видов приводился ранее [15], здесь даны лишь формулы в окончательном виде.

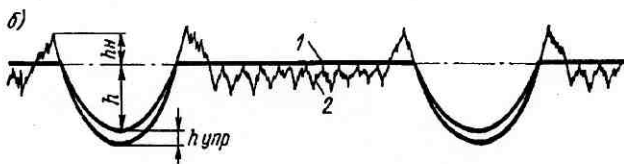


Рис. 58. Образование канавки на плоскости развертки кругового цилиндра (а) и образование отпечатка при вдавливании деформирующего элемента (б):

1 — принятый при расчете исходный микрорельеф; 2 — реальный исходный микрорельеф

Расчет F_k для микрорельефа вида I с некасающимися канавками производится по формуле

$$F_k = \frac{2\rho}{3d_3 s} [2d_3 + \sqrt{d_3^2 + (2ei)^2}] 100. \quad (13)$$

Особенность расчета F_k для микрорельефов видов II и III состоит в том, что в этих случаях необходимо учитывать площадь участков, по которым выдавливаемая канавка проходит более одного раза. Площадь одного такого участка для микрорельефа вида II обозначим через σ , а для микрорельефа вида III — через Σ .

Формулы для расчета этих величин:

$$\sigma = \frac{16\pi d_3 e G^3}{3i}, \quad (14)$$

где

$$G = \sqrt{\{i\} - \{i\}^2 + \frac{2\rho - s}{8e}}; \quad (15)$$

$$\Sigma = \frac{2\rho^2 [d_3^2 + i^2 (4e^2 - s^2)]}{i d_3 \sqrt{4e^2 - s^2}}. \quad (16)$$

Тогда для микрорельефа вида II с касающимися канавками

$$F_K = \frac{i(s - \sigma)}{\pi d_s s} 100, \quad (17)$$

а для микрорельефа вида III с пересекающимися канавками будет

$$F_K = \frac{i(s - 2\Sigma)}{\pi d_s s} 100. \quad (18)$$

Исходя из кинематической модели образования частично регулярного микрорельефа, М. В. Джаникашвили были предложены формулы для расчета площади канавок (S_K), в частности, при вибронакатывании прокатных валков:

для микрорельефов вида I

$$S_K = v_{ш} \frac{60}{n_{дв.к}} \rho, \quad (19)$$

где $v_{ш}$ — окружная скорость деформирующего элемента.

Динамическая скорость деформирующего элемента

$$v_{д.ш} = \sqrt{v_s^2 + v_{ш}^2}, \quad (20)$$

где v_s — окружная скорость заготовки.

Для микрорельефа вида II

$$S_K = \frac{\lambda \rho}{\cos \alpha} - \rho \frac{2e - s_{п}}{\sin \alpha}, \quad (21)$$

где $s_{п}$ — подача; $s_{п} = (S_K i) / (\theta \pi d_s)$; $\theta = 0,01 F_K$,
а относительная площадь канавки

$$F_K = \frac{v_{д.ш} 60 \rho}{n_s \pi d_s s_{п}} 100. \quad (22)$$

Для микрорельефа вида III

$$S_K = \frac{\lambda \rho}{\cos \alpha} - \frac{2\rho^2}{\sin \gamma \cos \alpha}, \quad (23)$$

где α — угол сетки,

$$\alpha = \arctg \frac{4e}{\lambda}. \quad (24)$$

Вибронакатывание с образованием частично регулярного микрорельефа нашло применение при восстановлении деталей наплавкой. В. И. Садовниковым предложены формулы для определения F_K в случае образования частично регулярного микрорельефа вида I с учетом физико-механических свойств металлопокрытий, определяющих величину отпечатка при вдавливании в них деформирующего элемента (обработка производилась шаром):

для наплавки проволокой 30ХГСА в CO_2

$$F_{\kappa} = \frac{0,07 P^{0,49} d_{\text{ш}}^{0,26}}{s d_3^{0,106}} \left[2 + \sqrt{1 + \left(\frac{2ei}{d_3} \right)^2} \right] 100, \quad (25)$$

где P — усилие вдавливания;

для наплавки проволокой Нп 80 под слоем флюса

$$F_{\kappa} = \frac{0,09 P^{0,559} d_{\text{ш}}^{0,26}}{s d_3^{0,18}} \left[2 + \sqrt{1 + \left(\frac{2ei}{d_3} \right)^2} \right] 100. \quad (26)$$

При образовании на цилиндрических поверхностях частично регулярного микрорельефа синусоидального вида обкатыванием роликами занимаемая выдавливаемыми канавками площадь и другие параметры микрорельефа определяются параметрами выпуклого микрорельефа деформирующих элементов — роликов [1]. Значения этих параметров, выявленные экспериментально пока лишь для одной детали (крутильное кольцо), приведены на рис. 43: $d_p = 45$ мм; $a = 1$ мм; $t = 4,3$ мм; $r = 2$ мм; $\varphi = 26^\circ$; $\omega = 90^\circ$; $b_p = 0,4$ мм. Образуемый таким роликом при $s = 2$ мм/об и $P = 330$ Н частично регулярный микрорельеф с площадью $F_{\kappa} = 33\%$ соответствовал микрорельефу вида I с такой же F_{κ} , создаваемому вибронакатыванием шаром диаметром $d_{\text{ш}} = 4,7$ мм; $n_{\text{дв. х}} = 1460$ 1/мин; $n_3 = 4,2$ рад/с; $s = 2$ мм/об; $P = 130$ Н.

Расчет угла сетки (α). Под углом сетки частично регулярного микрорельефа, образованного вибронакатыванием, понимается угол между осью абсцисс плоскости развертки данной поверхности и осевой линией непрерывной, регулярно расположенной неровности (см. рис. 59, а).

Величина этого угла определяет многие эксплуатационные свойства поверхности и, в частности, коэффициент трения, момент трогания, плавность хода и износостойкость трущихся поверхностей.

Значение угла сетки с некоторым приближением можно вычислить по формуле

$$\text{tg } \alpha = \frac{2en_{\text{дв. х}}}{n_3 d_3}. \quad (27)$$

Как видно из формулы, при данном диаметре обрабатываемой заготовки, изменяя амплитуду осцилляции деформирующего элемента и, главным образом, $i = n_{\text{дв. х}}/n_3$, можно в весьма больших пределах варьировать угол сетки, что наглядно иллюстрируется рис. 57, где приведены траектории движения деформирующего элемента.

Поскольку при большинстве используемых на практике режимов вибронакатывания $s \ll 2\pi i e$, приведенная формула для расчета угла α может быть использована в большинстве случаев с достаточной точностью.

Расчет числа элементов регулярного микрорельефа на единице площади (N). Этот параметр регулярного микрорельефа определяет характер протекания многих процессов на контакте твердых тел и твердого тела с различными фазами. На основе расчета числа элементов и моделирования формы элемента регулярного микрорельефа становится возможным расчет его площадных параметров. Число элементов N как шестиугольного, так и четырехугольного микрорельефа, приходящихся на единицу площади поверхности, определяется размером каждого элемента и рассчитывается по формуле

$$N = \frac{i}{\pi d_s s}. \quad (28)$$

В случае невыполнения условия ($s < 2e \sin \pi \{i\}$), для которого справедлива приведенная формула для расчета N , точность расчета по ней всегда удовлетворительна. Число элементов регулярного микрорельефа сетчатого вида (рис. 45) связано с индексом канавки (см. рис. 50) и подачей s следующим соотношением:

для шестиугольного типа микрорельефа

$$N = \frac{\sqrt{3}}{2s^2 (n^2 + n + 1)}; \quad (29)$$

для четырехугольного

$$N = \frac{1}{s^2 (n^2 + 1)}. \quad (30)$$

Расчет относительной опорной площади (Tp). Относительная опорная площадь поверхности — отношение опорной площади поверхности элемента регулярного микрорельефа к базовой площади элемента поверхности с регулярным микрорельефом, где p — уровень сечения элемента. Этот параметр из всех стандартизовавшихся до сих пор наиболее полно и точно отражает связь микрогеометрии поверхности практически со всеми ее служебными свойствами при контактировании твердых тел и твердого тела с жидкостью, газом или плазмой. Это связано с тем, что все явления на контакте обусловлены, в первую очередь, истинной площадью контакта, величина которого непосредственно определяется опорной площадью поверхности. В настоящее время разработано несколько методик расчета опорной площади поверхности в заданном уровне сечения. В частности, Tp можно определить по формуле, предложенной В. А. Забродиным,

$$Tp = \frac{ie}{S} \left\{ S^2 m_{\gamma} - \frac{\pi (Rz - p)}{C} + \frac{4 (Rz - p)}{C} \left[\frac{\pi}{2} - \arcsin \frac{Sm_{\gamma}}{2 \sqrt{\frac{2Rz - p}{C}}} - \frac{1}{2} \sin 2 \left(\arcsin \frac{Sm_{\gamma}}{2 \sqrt{\frac{Rz - p}{C}}} \right) \right] \right\}, \quad (31)$$

где $Sm_\gamma = \sqrt{S^2 + \left(\frac{\pi d_a K}{i}\right)^2}$; K — коэффициент, характеризующий сдвиг синусоиды по фазе; $K = 0,5$, когда при вибронакатывании в один период укладывается лишь одна синусоида; C — коэффициент, определяемый из граничных условий при

$$\frac{Sm_\gamma}{\sqrt{2}} = \sqrt{\frac{Rz - p}{C}}. \quad (32)$$

Расчет углов направления расположения элемента γ , β . Эти углы определяют направление впадин элементов, проходящих через попарно параллельные грани элементов, отсчитываются в системе координат, выбранной в зависимости от направления главных осей поверхности от оси абсцисс до линий, проходящих через середины противоположных сторон элементов (см. рис. 50).

Для шестиугольного типа регулярного микрорельефа таких направлений три, и определяются они тремя углами γ , β и β_1 ; угол β_1 можно рассматривать как вспомогательный. Для регулярного микрорельефа четырехугольного типа соответствующих направлений — два, и определяются они углами γ и β . Из рис. 50 [11]:

$$\operatorname{tg} \gamma = \frac{\pi d_a \{i\}}{is}; \quad (33)$$

$$\operatorname{tg} \beta = \frac{\pi d_a \{i\}}{is} \left(\frac{1}{n \{i\}} - 1 \right); \quad (34)$$

$$\operatorname{tg} \beta_1 = \frac{\pi d_a \{i\}}{is} \left(\frac{1}{n \{i\}} - \frac{n+1}{n} \right). \quad (35)$$

Значение угла γ для регулярного микрорельефа правильной формы (i — целое число) определяется по формулам:

для шестиугольного микрорельефа
 $\gamma = \operatorname{arctg} n$;

для четырехугольного

$$\gamma = \operatorname{arctg} \frac{2n+1}{\sqrt{3}}. \quad (36)$$

Значения других углов находятся из геометрических соотношений правильных шести- и четырехугольников.

Помимо расчета стандартизованных параметров частично регулярных и регулярных микрорельефов поверхностей при решении задачи их оптимизации в ряде случаев возникает необходимость расчета и других параметров, в частности, радиуса впадин частично регулярного микрорельефа с элементами вогнутой формы и радиуса выступов поверхности с элементами выпуклой формы, количества выступов на единице площади поверхностей с частично регулярным микрорельефом, их опорной поверхности, удельного объема канавок, коэффициента объемного заполнения¹.

¹ Получены Я. С. Фельдманом.

Расчет величины радиуса закругления канавки (r'). Этот параметр определяет форму выдавливаемой канавки, условия удержания смазки и перетекания ее из канавки в зону контакта поверхностей, смачиваемость, усталостную и коррозионную прочность, пылеудаляемость. Принимая r' как среднее (интегральное) значение радиусов кривизны кривых канавки в их нижних точках на участке одной волны, получим

$$r' = \frac{d_3}{2} \left(1 + \frac{\operatorname{tg}^2 \alpha}{2} \right), \quad (37)$$

где α — угол сетки, тангенс которого определяется по формуле (27).

Расчет радиуса выступов частично регулярного микрорельефа с элементами выпуклой формы (r). Этот параметр определяет практически все условия контакта твердых тел и твердых тел с различными фазами. Поскольку частично регулярный микрорельеф с элементами выпуклой формы в настоящее время может быть создан лишь способом холодной прокатки в вибронакатанных валках при условии полной отпечатываемости их микрорельефа, можно принять, что $r = r'_{\text{валка}}$.

Экспериментальные исследования показали, что в большинстве случаев величину r выступов холоднокатанных листов, лент и деталей (см. рис. 47) можно принять равной величине радиуса деформирующего элемента, которым вибронакатывались прокатные валки.

Расчет количества выступов (пятен контакта) поверхности с частично регулярным микрорельефом (N_1). Этот параметр определяет многие условия контакта, в первую очередь, трущихся со смазкой поверхностей твердых тел. Так, при создании систем канавок, например, с целью оптимизации площади контакта и маслосъемности контактирующих поверхностей, при одинаковой площади канавок далеко не равнозначно: будет ли эта система канавок образована большим числом малых по площади канавок или малым числом канавок большой величины. Практика нормирования конструктором числа пятен контакта известна при обработке поверхностей шабрением. Технологическое обеспечение нормируемого конструктором числа пятен контакта способом вибронакатывания несравнимо надежнее и точнее, чем шабрением, поскольку может быть рассчитано аналитически. При этом максимальное число пятен, приходящихся на единицу площади, принимаемой для шабрения ($N_1 = 25$), равной одному квадратному дюйму, при вибронакатывании может быть значительно большим (200 и более), а расположение — строго регулярным.

Расчет числа выступов, приходящихся на 1 мм^2 , может быть произведен по формуле

$$N = \frac{i}{\pi d_{3s}}, \quad (38)$$

а приходящихся на квадрат площадью $25 \times 25 \text{ мм}^2$

$$N_{25 \times 25} = \frac{625i}{\pi d_{\text{гс}}} \quad (39)$$

для микрорельефов вида II.

Для микрорельефов вида III, когда каждой волне канавки соответствует два выступа,

$$N_{25 \times 25} = \frac{1250i}{\pi d_{\text{гс}}} \quad (40)$$

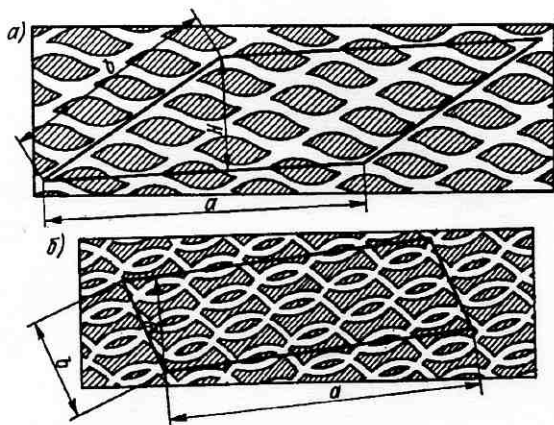


Рис. 59. К определению числа выступов (пятен контакта) на виброобкатанных поверхностях: а — вида II; б — вида III

Число выступов может быть определено и экспериментально по рис. 59

$$N_{\text{г}} (25 \times 25) = \frac{625m}{aH}, \quad (41)$$

где m — число полных пятен контакта внутри параллелограмма, подсчитываемое непосредственно по отпечатку; H и a — соответственно высота и сторона параллелограмма.

Расчет опорной поверхности с частично регулярным микрорельефом ($F_{\text{оп}}$). Этот параметр так же, как параметр Tr для регулярного микрорельефа определяет площадь контакта и маслосъемкость сопрягаемых поверхностей с частично регулярным микрорельефом при заданном уровне сближения a . С некоторым приближением (без учета наплывов по краям канавок) $F_{\text{оп}}$ может быть определена по формулам:

для микрорельефа вида I

$$F_{\text{оп}} = 100 - \sqrt{1 - \frac{a}{h}} F_{\text{к}}; \quad (42)$$

для микрорельефа вида II

$$F_{\text{оп}} = \left[1 - \frac{i(s_a - \sigma_a)}{\pi d_3 s} \right] 100, \quad (43)$$

где

$$s_a = \frac{2\pi \sqrt{d_{\text{ш}}(h-a)}}{3i} [2d_3 + \sqrt{d_3^2 + (2ei)^2}]; \quad (44)$$

$$\sigma_a = \frac{16\pi d_3 e C_a^2}{3i}; \quad (45)$$

$$C_a = \sqrt{\{i\} - \{i\}^2 + \frac{2\sqrt{d_{\text{ш}}(h-a)} - s}{8e}}; \quad (46)$$

для микрорельефа вида III

$$F_{\text{оп}} = \left\{ 1 - \frac{i \left[s_a - 2 \left(1 - \frac{a}{h} \right) \sum \right]}{\pi d_3 s} \right\} 100. \quad (47)$$

Расчет удельного объема канавки (V_k). Этот параметр определяет, в первую очередь, маслоемкость поверхности, величина которой изменяющаяся во времени (особенно интенсивно в период приработки), дает представление о протекании этого процесса, обуславливающего надежность и долговечность пары трения. Особый интерес расчет V_k представляет для микрорельефа вида I. При заданном сближении a , удельный объем канавки может быть рассчитан по формуле

$$V_k = \frac{2(h-a)i \sqrt{1 - \frac{a}{h}} s}{3\pi d_3 s}. \quad (48)$$

Расчет коэффициента объемного заполнения (K_V). Этот параметр определяет соотношение объемов материала и пустот в поверхностном слое, ограниченном у тел вращения цилиндрическими поверхностями, проходящими через наивысшие и наинизшие точки микрорельефа. Соотношение характеризуется коэффициентом K_V , от величины которого зависят такие эксплуатационные свойства, как тепло- и электропроводность, характер трения, гидроплотность и др. Значение коэффициента K_V изменяется в значительных пределах в период от начала приработки до момента установления нормального износа пар трения, поэтому его необходимо рассчитывать для заданного уровня сближения a .

Коэффициент K_V для поверхности частично регулярного микрорельефа вида I при заданном сближении может быть рассчитан по формуле

$$K_V = 1 - \frac{2}{3\pi d_3 s} \sqrt{1 - \frac{a}{h}}. \quad (49)$$

Формулы расчета коэффициента K_V для частично регулярных микрорельефов вида II и III были приведены в работе [15].

Расчет относительной площади канавок на торцевой поверхности] (F_K). Все приведенные выше методики расчета параметров частично регулярного и регулярного микрорельефов охватывали лишь цилиндрические поверх-

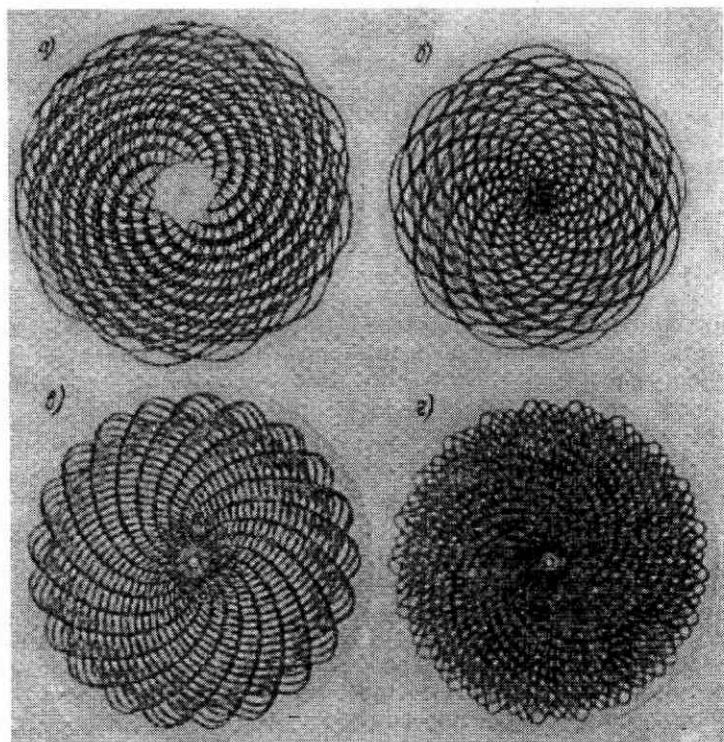


Рис. 60. Варианты записей траекторий движения деформирующего элемента при вибронакатывании торцевой поверхности ($n_{дв. х} = 4200$ 1/мин; $s = 0,57$ мм/об; $l = 3,5$ мм; $d_{ш} = 8$ мм) при частоте вращения заготовки (n_3 , рад/с), равной: а — 1000; б — 800; в — 630; г — 140

ности. В последнее время появилась необходимость расчета параметров, в частности, частично регулярного микрорельефа, создаваемого на торцевой поверхности (см. рис. 5, б). Особенность такого микрорельефа — закономерно изменяющаяся степень перекрытия выдавливаемыми канавками с изменением радиуса торцевой поверхности (рис. 60) — определяет и особенность расчета ряда параметров и, в частности, относительной площади канавок.

Для микрорельефа вида I F_K рассчитывается по формуле ¹

$$F_K = \frac{200\rho}{3s_1 R_{CP}} (2R_{CP} + \sqrt{R_{CP}^2 + e^2 i^2}); \quad (50)$$

для микрорельефа вида II

$$F_K = \frac{200\rho}{3\pi s_1 R_{CP}} [\pi (2R_{CP} + \sqrt{R_{CP}^2 + e^2 i^2} - 6\rho i)], \quad (51)$$

где ρ — радиус отпечатка канавки (см. рис. 58, а); $R_{CP} = (R_1 + R_2)/2$ — средний радиус вибронакатанного участка торцевой поверхности; s_1 — поперечная подача.

Расчет угла сетки частично регулярного микрорельефа на торцевой поверхности (α). Угол сетки может быть рассчитан по формуле

$$\alpha = \arctg \frac{4ei + s_1}{s_1 (2\pi K + \varphi) - \frac{4ei}{2\pi K + \varphi}}, \quad (52)$$

где $K = 0, 1, 2, 3 \dots$ — указанные номера витка спирали, на котором рассматривается синусоидальная канавка; φ — полярный угол.

Практически все геометрические параметры частично регулярных и регулярных микрорельефов, определяемые кинематическими зависимостями различных процессов их образования и, в первую очередь, способом вибронакатывания, могут быть аналитически рассчитаны как функции параметров режима обработки. Это одно из основных достоинств регулярных микрорельефов, обуславливающее совершенство нормирования, технологического обеспечения и контроля микрогеометрии технических поверхностей деталей машин и приборов и повышения их качества и надежности.

Иное положение с возможностями расчета параметров регулярных микрорельефов, определяемых динамическими зависимостями процессов их образования.

Динамические зависимости. К параметрам, значения которых определяются главным образом динамическими зависимостями процесса вибронакатывания и других способов, основанных на холодном пластическом деформировании обрабатываемых материалов, относятся (по ГОСТ 24773—81) глубина регулярно расположенных канавок поверхности h частично регулярных микрорельефов с элементами вогнутой формы, высота регулярно расположенных неровностей частично регулярных микрорельефов с элементами выпуклой формы и высота элемента R регулярного микрорельефа.

Особенность технологического обеспечения этих высотных параметров состоит в том, что в отличие от шаговых, площадных, объемных, значения этих параметров аналитически не могут быть

¹ Получены Я. С. Фельдманом и С. М. Эленом.

рассчитаны. Это обусловлено тем, что размеры h и R зависят не только от динамических параметров режима обработки давлением, но и от свойств обрабатываемых металлов.

В аналитических зависимостях эти свойства не могут быть учтены однозначно, поскольку для вибронакатывания, как и для других процессов холодной обработки давлением, зависимость напряжение—деформация для сплавов металлов практически не может быть установлена. Поэтому при вибронакатывании и динамические параметры режима обработки выявляются экспериментально. К таким параметрам режима обработки относятся усилие вдавливания деформирующего элемента в заготовку и радиус сферы рабочего участка деформирующего элемента¹. В настоящее время в результате исследований накоплено много экспериментально выявленных зависимостей остаточной деформации, характеризующейся параметрами h и R , от усилия вдавливания и радиуса деформирующего элемента. Рассмотрим основные зависимости.

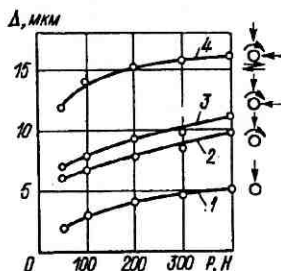


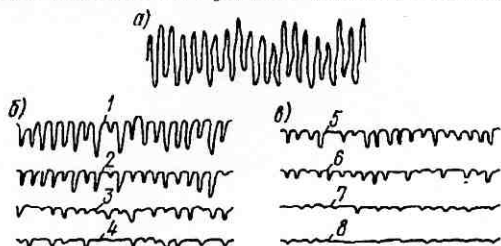
Рис. 61. Зависимость остаточной деформации Δ от усилия вдавливания P при различных схемах деформирования:

- 1 — вдавливание (лунка);
- 2 — обкатывание без продольной подачи (круговая канавка);
- 3 — обкатывание с продольной подачи (круговая площадка);
- 4 — вибронакатывание (синусоидально расположенная круговая канавка)

Усилие вдавливания деформирующего элемента (P). Этот параметр режима при образовании регулярных микрорельефов определяет величину остаточной деформации. Остаточная деформация тем больше, чем больше усилие вдавливания и чем меньше сопротивление обрабатываемого материала пластическому деформированию. Поэтому для определения остаточной деформации, например при вибронакатывании, определяющей глубину канавок, или высоту h выступов при создании частично регулярных микрорельефов, или высоту элемента регулярного микрорельефа R , могут быть использованы зависимости, полученные автором для гладкого обкатывания шарами и обкатывания между роликами [16, 18]. При этом должны быть учтены особенности процесса вибронакатывания, обусловленные отличной от гладкого обкатывания кинематикой. Эти особенности сводятся к следующему. Деформирующий элемент (все исследования выпол-

¹ Основным силовым параметром обкатывания, вибронакатывания, ударного вибронакатывания и других процессов образования нерегулярных и регулярных микрорельефов, определяющим величину остаточной деформации и все показатели упрочнения, является давление. Однако, поскольку практически все устройства для обработки давлением снабжены силовыми элементами, тарированными в ньютонах, здесь и в дальнейшем приводятся значения усилия вдавливания деформирующего элемента.

нялись автором с использованием в качестве деформирующих элементов шаров), совершая при вибронакатывании несравнимо более сложное движение относительно обрабатываемой поверхности, чем при обкатывании, «атакует» каждый микровыступ исходной поверхности в различных направлениях, как бы раскатывая металл, в результате чего сопротивление деформированию уменьшается; деформирующее действие возрастает. С позиций дислокационной теории увеличение деформирующего действия с усложнением кинематики процесса пластического деформирова-



Обозначение профилограммы	Rz, мкм	Класс шероховатости	P, Н	Обозначение профилограммы	Rz, мкм	Класс шероховатости	P, Н
1	10,9	5	100	5	4,9	7	100
2	6,1	6	300	6	2,9	8	300
3	4,0	7	600	7	1,6	9	600
4	2,3	8	600	8	0,7	10	600

Рис. 62. Профилограммы поверхностей: а — исходная поверхность после обточки, $Rz = 19,3$ мкм; б — обкатанных; в — вибронкатанных при различных усилиях вдавливания

ния объясняется увеличением числа плоскостей скольжения, очагов возникновения и развития пластической деформации, уменьшением накопленной энергии и сопротивления развитию деформации на каждом направлении.

На рис. 61 приведен график зависимости остаточной деформации (определялась на специальном устройстве по глубине выдавливаемой лунки, круговой канавки и круговой площадки) от усилия вдавливания шара при четырех различных схемах деформирования (1—4).

Как видно из рисунка, с усложнением перемещения шара относительно деформируемой поверхности при прочих равных условиях деформирующее его действие возрастает. Выполненные позднее подобные исследования с алмазным сферическим наконечником в качестве деформирующего элемента, работающего с трением скольжения (а не качения, как при работе с шаром), выявили аналогичный характер зависимости деформирующего действия от схемы деформирования. Эта особенность процесса вибронакатыва-

ния имеет большое практическое значение. При обработке мало- и неравножестких деталей становится возможным образование оптимального микрорельефа и значительное упрочнение поверхностного слоя металла без деформации заготовки по всему ее сечению. Из сопоставления профилограмм (рис. 62), снятых с поверхностей стальных образцов (сталь 45), обработанных обкатыванием и вибронакатыванием, видно, насколько при прочих равных условиях интенсифицируется процесс пластического деформирования металла выступов исходных микронеровностей и их сглаживание

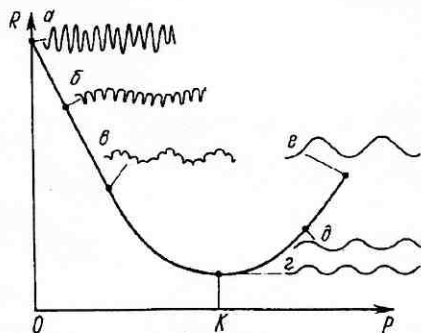


Рис. 63. Типовой график зависимости степени выглаживания и высоты образующихся при вибронакатывании микронеровностей от усилия вдавливания деформирующего элемента

при вибронакатывании по сравнению с обкатыванием. Такова первая особенность процесса вибронакатывания. Вторая особенность состоит в том, что в отличие от обкатывания зависимость степени сглаживания от усилия вдавливания деформирующего элемента в обрабатываемую поверхность при вибронакатывании нелинейна (рис. 63). При малых усилиях вдавливания шара происходит сглаживание микронеровностей исходной поверхности (а) за счет деформации вершин их выступов (б) аналогично обкатыванию; с увеличением усилия образуется новый микрорельеф со следами невыглаженных исходных неровностей на участках наиболее глубоких впадин (в). Дальнейшее увеличение усилия вибронакатывания приводит к полному выглаживанию исходных неровностей (г) и образованию полностью нового микрорельефа, высота, форма и расположение неровностей которого будут определяться не только величиной усилия, но и диаметром шара, скоростью, подачей, числом осцилляций и амплитудой колебания шара.

При дальнейшем увеличении усилия происходит выдавливание материала из основного его слоя, лежащего ниже уровня микронеровностей исходной поверхности. При этом, варьируя все параметры режима вибронакатывания, становится возможным формирование микрорельефа, отличающегося большой высотой неровностей с большими радиусами выступов и впадин и малыми углами наклона их образующих (д и е).

Таким образом, если при усилиях вибронакатывания, лежащих в интервале значений от 0 до К (рис. 63), материалом для формирования нового микрорельефа служит металл выступов исходной поверхности, то при больших усилиях новый микрорельеф форми-

руется также и из основного металла заготовки. Эта особенность процесса вибронакатывания открывает новые возможности управления образованием микрорельефа поверхностей деталей машин и приборов и технологического обеспечения задаваемых конструктором как стандартных, так и еще нестандартизованных характеристик качества поверхности.

Усилие вибронакатывания, как и при обкатывании, может быть определено двумя способами: 1) ориентировочным расчетом по ранее описанной методике [11, 15, 16] с последующей корректировкой; 2) пробными проходами на образцах или заготовках обрабатываемых деталей. Второй способ состоит в том, что, постепенно увеличивая усилие вибронакатывания (начиная от 50—100 Н), выявляют то минимальное его значение, при котором достигается требуемая глубина выдавливаемой канавки (при создании системы масляных каналов или при декоративной обработке), степень выглаживания исходной поверхности (при отделочной обработке), или степень выглаживания и упрочнения (при отделочно-упрочняющей обработке).

В большинстве случаев практики приходится работать в зоне малых усилий, характеризующихся левой ветвью кривой на рис. 63 до точки *K*. Поэтому большая часть исследований посвящена выявлению зависимостей между усилием вибронакатывания и степенью выглаживания микронеровностей исходной поверхности, когда создаются поверхности с полностью перекрытой исходной поверхностью, а при образовании системы смазочных каналов — зависимостей между усилием и глубиной выдавливаемых канавок. Из рис. 63 виден характер зависимости между усилием и степенью сглаживания неровностей исходной поверхности.

Усилие вибронакатывания является основным параметром режима, варьируя который можно наиболее эффективно влиять на степень сглаживания. Из остальных параметров режима некоторое влияние (значительно меньшее, чем усилие) оказывает скорость вибронакатывания. С увеличением скорости остаточная деформация несколько снижается. За меру остаточной деформации и степени выглаживания можно принять изменение диаметра заготовки Δd (уменьшение при обработке наружных и увеличение при обработке внутренних поверхностей), разность высот исходных и образующихся неровностей $S = Rz_{исх} - Rz$ или коэффициент

$$\lambda = \frac{Rz_{исх}}{Rz}. \quad (53)$$

В табл. 5 приведены экспериментально полученные значения Δd , $Rz_{исх} - Rz$ и λ для различных условий вибронакатывания стали 45 при следующих постоянных значениях остальных характеристик режима: $d_{ш} = 30$ мм; $v = 40$ м/мин; $s = 0,07$ мм/об; $n_{дв. х} = 4200$ 1/мин; $l = 3,5$ мм; смазка машинным маслом С30. Остаточная деформация, определяемая величиной давления виб-

ронакатывания будет зависеть от диаметра шара $d_{ш}$ или радиуса сферы алмазного наконечника r и диаметра обрабатываемой заготовки d_3 . С уменьшением $d_{ш}$, r , d_3 площади контакта деформирующего элемента с обрабатываемой поверхностью будут возрастать, давление, остаточная деформация и соответственно степень сглаживания неровностей исходной поверхности или глубина выдавливаемых канавок будут увеличиваться.

5. Зависимость степени выглаживания исходных неровностей от усилия и скорости вибронакатывания

Усилие вибронакатывания, Н	Частота вращения заготовки n_3 , рад/с	Rz , мкм	Остаточная деформация Δd , мкм	$Rz_{исх} - Rz$, мкм	$\lambda = Rz_{исх} / Rz$
100	18	4,9	25,0	14,4	1,74
200	18	3,7	25,0	15,6	1,60
300	18	2,9	25,0	16,4	1,53
400	18	2,5	25,5	16,8	1,54
500	18	2,1	26,8	17,2	1,56
600	18	1,6	27,6	17,7	1,56
600	9	1,4	27,8	17,9	1,55
600	4,5	1,3	28,3	18,0	1,57
600	2,3	1,1	28,5	18,2	1,57
600	1,2	0,7	29,5	18,6	1,58

Диаметр шара. Размер шара выбирается в зависимости от жесткости и габаритных размеров обрабатываемой заготовки. При обработке мало- и неравножестких деталей необходимо применять шары малого диаметра, так как в этом случае необходимое деформирующее действие осуществляется при меньших усилиях вибронакатывания, а следовательно, можно производить обработку с меньшей опасностью деформирования заготовки по всему ее сечению (прогиб по длине, деформация стенок полых деталей, образование разностенности и т. п.). С уменьшением габаритных размеров деталей также приходится уменьшать диаметр шара с тем, чтобы получать требуемый рисунок поверхности, например при декоративном вибронакатывании. Так, при обработке металлических колпачков авторучек применяются в качестве деформирующих элементов шары диаметром 1—2 мм. При необходимости перекрытия исходной поверхности, когда заготовка достаточно жестка, а объем канавок не является регламентируемым параметром, наиболее производительна обработка шарами большого диаметра. В этом случае при прочих равных условиях образуется канавка большей ширины и соответственно меньшей глубины. При обработке твердых материалов и закаленных сталей ($HRC > 40-42$) необходимо применять шары меньшего диаметра для создания достаточного давления.

В настоящее время для вибронакатывания используются шары диаметром 2—20 мм. При использовании в качестве деформирующих элементов алмазных наконечников возможности варьирования величины радиуса их сферической рабочей части ограничены сортаментом алмазных наконечников ($r = 0,5 \div 4,0$ мм), изготавливаемых Томилинским заводом алмазных инструментов. Зависимость между усилием вибронакатывания и глубиной канавки показана на рис. 64. График построен по данным обработки вибронакатыванием наружной цилиндрической поверхности образцов из стали 45 при следующем режиме: $n_3 = 1,5$ рад/с; $n_{дв. х} = 461$ 1/мин; $l = 1,75$ мм; $s = 3,0$ мм/об. Как видно из графика, канавки наибольшей глубины образовывались при прочих равных условиях при обработке заготовок меньшего диаметра ($d_3 = 24$ мм) шаром наименьшего диаметра из испытывавшихся шаров ($d_{ш} = 5,55$ мм).

При использовании в качестве деформирующего элемента вместо шара алмазного наконечника для вибронакатывания закаленных и азотированных сталей деформирование металла протекает несколько иначе, чем при обкатывании шаром¹. Трение скольжения между рабочей сферической поверхностью алмаза и обрабатываемой поверхностью в отличие от трения качения при работе шаром и высокая его твердость не может не сказаться на качественных характеристиках обрабатываемого металла, что и подтвердили результаты выполненных автором исследований.

На рис. 65 приведены графики зависимостей глубины выдавливаемой алмазным наконечником и шаром канавок при вибронакатывании наружной и внутренней цилиндрической поверхностей. Как видно из графиков, остаточная деформация при вибронакатывании алмазом несколько больше, чем при обработке шаром, что объясняется дополнительным деформирующим действием, вызванным скольжением алмаза относительно обрабатываемой поверхности. Большая остаточная деформация при обработке наружной цилиндрической поверхности по сравнению с обработкой внутренней поверхности (даже при несколько большем наружном

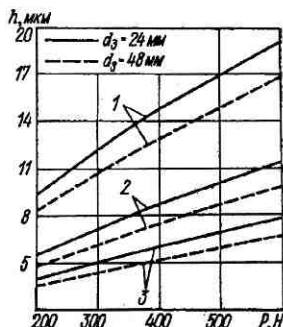


Рис. 64. Зависимость глубины h выдавливаемой канавки от усилия вибронакатывания шарами диаметром: 1 — 5,5 мм; 2 — 11,87 мм; 3 — 19,82 мм

¹Поскольку алмаз не катится, а скользит по обрабатываемой поверхности, процесс обработки в этом случае лишь условно может быть назван вибронакатыванием. Однако применение термина «вибровыглаживание» (как это делают некоторые исследователи) неверно и недопустимо. Как видно из рис. 63, во многих случаях сглаживания исходных неровностей не происходит, наоборот новый регулярный микрорельеф отличается большими по высоте неровностями, чем исходные.

диаметре образца) объясняется меньшей поверхностью контакта шара или алмаза с обрабатываемой поверхностью. Сколь существенна зависимость остаточной деформации от твердости обрабаты-

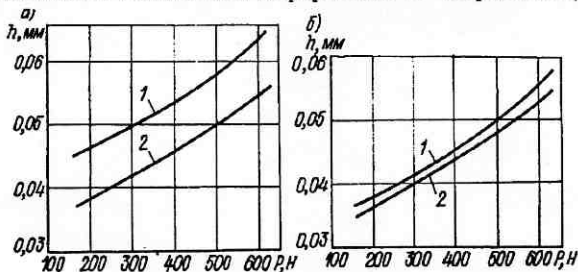


Рис. 65. Зависимость глубины выдавливаемой алмазным наконечником (кривая 1) и шаром (кривая 2) канавки от усилия выдавливания при вибронакатывании наружной (а) и внутренней (б) поверхности (сталь 45; диаметр наружной поверхности 129 мм, внутренней — 121 мм; $d_{ш} = 2$ мм; $r = 1$ мм; $n_3 = 0,4$ рад/с; $n_{дв.х} = 1400$ 1/мин; $s = 1,9$ мм/об)

ваемого металла, можно судить по графикам на рис. 65 и 66. При вибронакатывании алмазом ($r = 1,0$ мм; $n_3 = 2,625$ рад/с; $n_{дв.х} = 1400$ 1/мин; $s = 1,9$ мм/об) алюминиевого сплава ВД16 ($HВ$ 120—140), стали 45 (HRC 33—37), цементированной и азотированной стали 38ХМЮА (HRC 60—62) остаточная деформация была тем большей, чем мягче и пластичнее был обрабатываемый материал. При этом во всех случаях характер зависимостей остаточной деформации от усилия вибронакатывания оставался постоянным. В настоящее время исследователями получено много эмпирических формул для расчета глубины выдавливаемых канавок. А. К. Барсегян для расчета глубины канавок, выдавливаемых на боковых сторонах витков червяков и винтов, предложил формулы:

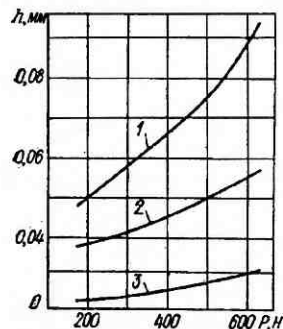


Рис. 66. Зависимость глубины выдавливаемой алмазным наконечником канавки от усилия вибронакатывания наружной цилиндрической поверхности образцов: 1 — алюминиевого сплава ВД16; 2 — стали 45; 3 — азотированной стали 38ХМЮА

$$h = 4,13 \frac{P^{0,44}}{d_{ш}^{0,47} n_3^{0,12}}; \quad (54)$$

для незакаленных

$$h = 9,39 \frac{P^{0,48}}{d_{ш}^{0,54} n_3^{0,24}}. \quad (55)$$

В зависимости от свойств обрабатываемого металла и усилия вибронакатывания значительно изменяются не только размеры, но и форма выдавливаемых канавок, а также соотношение высот

исходных неровностей и образующихся с двух сторон канавки из выдавленного металла — напльвов (рис. 67). Если при обработке стали 45 (профилограммы 2) напльвы соразмерны с неровностями исходной, обточенной поверхности, то при вибронакатывании мягкого пластичного алюминиевого сплава ВД16, их высота уже при усилии обработки 400 Н значительно превышает высоту исходных неровностей (профилограммы 1). Однако соотношение высот неровностей и напльвов зависит не только от

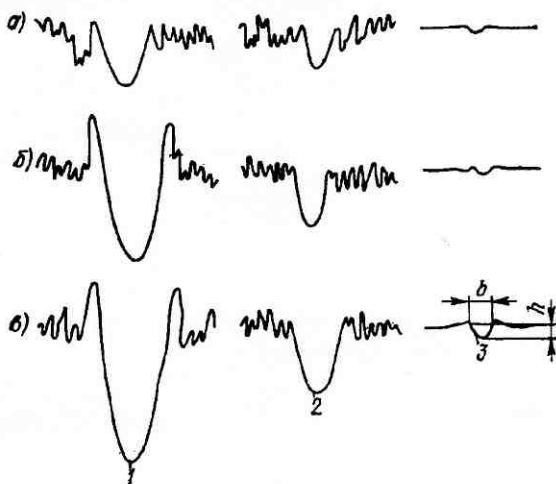


Рис. 67. Зависимость формы и размеров выдавливаемых канавок от свойств обрабатываемого металла и усилия вдавливания при вибронакатывании (a — 200 Н; $б$ — 400 Н; $в$ — 600 Н):

алюминиевый сплав ВД16; 2 — сталь 45; 3 — сталь 38ХМЮА

свойств обрабатываемого металла и усилия вибронакатывания, но и от тщательности обработки исходной поверхности. Как видно из профилограмм 3, при вибронакатывании поверхности из высокотвердой стали 38ХМЮА, даже при относительно малом усилии ($P = 196$ Н) высота напльвов превышает высоту исходных неровностей.

При вибронакатывании с целью образования системы канавок напльвы должны учитываться, поскольку они определяют не только размер обработанной детали, но и величину исходной опорной поверхности в первый период ее приработки, а также площадь и объем выдавливаемых канавок и соответственно эксплуатационные свойства вибронакатанных поверхностей. Образование напльвов может быть использовано для «подъема размеров» изношенных поверхностей (например, калибров, валов, осей, втулок). В гл. III этот вопрос рассмотрен более подробно.

Усилие вибронакатывания определяет не только геометрические, но и физические характеристики качества поверхностей. Холодная пластическая деформация сопровождается наклепом, увеличением микротвердости обрабатываемого металла. При образовании полностью перекрытой канавками поверхности новая поверхность упрочнена вся (как выступы, так и впадины), при образовании системы канавок — упрочнены участки впадин и наплывов.

Кривые зависимости микротвердости от усилия вибронакатывания шаром и алмазом (рис. 68) однотипны и имеют точку перегиба, соответствующую началу перенаклепа.

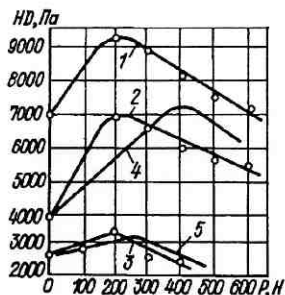


Рис. 68. Зависимость микротвердости от усилия вдавливания алмазного наконечника образцов из стали ШХ15 с HRC 58—62 (кривая 1), стали 45 (кривая 2), сплава ВД16 (кривая 3) и шаром стали 45 (кривая 4) и сплава ВД16 (кривая 5)

Лишь перенаклеп стали 45 при обкатывании шаром (кривая 4) наступает при значительно большем усилии ($P = 490$ Н). При этом несколько выше и максимальная степень упрочнения 7260 МПа. Это может быть объяснено неблагоприятным воздействием на поверхностные слои относительно твердых материалов значительных сил трения, возникающих при вибронакатывании алмазом.

Таким образом, при правильном ведении процесса вибронакатывания можно сочетать оптимизацию микро рельефа со значительным поверхностным упрочнением обрабатываемого металла, характеризующимся даже для закаленных сталей (HRC 61—63) увеличением микротвердости на 25—30 % по сравнению с исходной.

Вибронакатывание для восстановления размеров деталей осуществляется за счет образования выдавленных из канавок наплывов при создании системы канавок или выступов, превышающих размеры неровностей исходной поверхности (см. рис. 63); основным показателем процесса будет изменение размера. Зависимости между изменением размера и усилием вибронакатывания должны устанавливаться экспериментальным путем. Исходными данными могут служить приведенные выше результаты исследований обработки термически не обработанных, закаленных и азотированных сталей.

Эти же данные могут быть использованы и при обработке режима вибронакатывания при использовании его с целью декоративной обработки, когда задается глубина канавок, образующих

требуемый «рисунок». При обработке закаленных и азотированных металлов недостаточная прочность алмаза ограничивает возможность образования канавок глубиной не свыше 8—10 мкм. Однако в ряде случаев выявилась необходимость вибронакатывания высокотвердых металлов с образованием системы канавок значительно большей глубины (более 50 мкм). Для этих случаев автором был разработан¹ технологический процесс, включающий следующие основные операции:

1) нанесение на окончательно обработанную поверхность под вибронакатывание электроизоляционной пленки (например, битумного лака);

2) вибронакатывание на глубину пленки с обнажением металла (инструмент — металлический резец—лопатка);

3) электрохимическое протравливание на требуемую глубину обнаженных вибронакатыванием участков заготовки.

Описанным способом обрабатывались азотированные (*HRC* 70—72) гильзы двигателей диаметром 200 мм и более. Длительность протравливания канавок глубиной 60—80 мкм не превышала 8—10 мин.

Таким образом, экспериментально выявляются не только динамические зависимости между режимом обработки и значениями высотных параметров h и R , но и для частных конкретных условий и различных обрабатываемых материалов численные значения усилия вдавливания деформирующего элемента и радиуса сферы рабочего его участка.

Исследователями предложены также для приближенного расчета аналитические и эмпирические формулы, с выявленными уже значениями коэффициентов. Так, Ю. П. Кузьминым предложена для приближенного определения высоты элемента регулярного микрорельефа вида IV формула

$$R = r - \sqrt{r^2 - \left(\frac{L}{2}\right)^2} \approx \frac{L^2}{8r}, \quad (56)$$

где R — высота выступов; r — радиус сферы деформирующего элемента; L — наибольший размер элемента между противоположными его углами (см. рис. 52).

Для микрорельефа шестиугольного типа правильной формы

$$L = \frac{2}{\sqrt{3}} S_{\gamma}; \quad (57)$$

для четырехугольного

$$L = \sqrt{2} S_{\gamma},$$

где S_{γ} — шаг по направлению γ (см. рис. 50), который определяется из выражения

$$S_{\gamma}^* = \sqrt{\left(\frac{\pi d_a \{i\}}{i}\right)^2 + s^2}. \quad (58)$$

¹ Совместно с Г. Т. Томилиным, В. Г. Кузнецовой и Г. Г. Лебединским.

При определении радиуса сферы деформирующего элемента исходят из условия обеспечения заданной высоты элемента регулярного микрорельефа

$$r \approx \frac{L^2}{8R} \quad (59)$$

При этом необходимо учитывать как величину усилия вдавливания деформирующего элемента, так и жесткость обрабатываемой заготовки, накладывающих ограничение на величину r .

Приближенность приведенного расчета определяется следующими принятыми допущениями: вывод формул из чисто геометрического построения образования элемента регулярного микрорельефа без учета свойств обрабатываемого материала — его сопротивления пластическому деформированию и упругого последствия; принятие формы впадины элемента в виде сферической лунки; отсутствие следов исходной под вибронакатывание шероховатой поверхности.

При расчетах усилий вдавливания в качестве характеристик свойств металла чаще всего используют твердость по Бринелю или величину временного сопротивления. Однако эти характеристики, так же как и другие, например относительное удлинение, определяемые в статике при вдавливании индентора в испытуемую поверхность, недостаточно хорошо коррелируются с характеристиками, определяющими сопротивление материала пластическому деформированию в динамике, например при обкатывании шаром и тем более при вибронакатывании [16, 17]. Если при испытании на приборе Бринеля происходит деформация смятия, а при определении σ_v и δ — деформация растяжения, то при обкатывании — круговой сдвиг, а при вибронакатывании — круговой сдвиг с периодическими смещениями поверхностных слоев металла в осевом направлении в сторону подачи и в обратную сторону.

Различие схем деформирования не может не сказаться на значениях характеристик, определяющих сопротивление материала пластическому деформированию и упругое последствие.

Более точная, предложенная автором характеристика твердости при обкатывании [18] требует в каждом случае предварительных испытаний. Повышение точности расчета за счет учета фактической площади контакта деформирующего элемента с шероховатой обрабатываемой поверхностью [16] также требует довольно трудоемкого экспериментального выявления значений коэффициентов. Поэтому наиболее надежным и широко используемым в практике способом определения значений P и r как при гладком, так и при вибрационном накатывании является способ экспериментального их выявления. Большой накопленный опыт показывает, что достаточно точное определение оптимального значения P при выбранном значении r не требует более 4—6 проходов с различным давлением на участках шириной 15—20 мм. Большое число данных для широкой номенклатуры материалов.

деталей различной конструкции и разных условий обработки, приведенных в табл. 8, может быть непосредственно использовано при решении многих задач, связанных с определением R и r , или послужить в качестве исходных.

На основе описанных кинематических и динамических зависимостей образования регулярных микрорельефов и данных расчетов или экспериментальных исследований определяется режим обработки, обеспечивающий создание регулярного микрорельефа с пронормированными конструктором значениями его параметров.

Во многих случаях режим обработки выявляется в процессе экспериментального исследования, проводимого по заданию конструктора на стадии, предшествующей проектированию машины или прибора для выявления оптимального микрорельефа поверхности. Такие исследования выполняют на деталях или имитирующих их образцах и при определении оптимального микрорельефа сопоставлением различных их вариантов. Одновременно фиксируется тот режим, при котором оптимальный микрорельеф создавался; этот режим и переносится в карту технологического процесса. Таким образом, одновременно решаются две задачи: нормирование качества поверхности (при выявлении оптимального микрорельефа определяются и значения физических параметров качества поверхности — микротвердость, знак и величина поверхностных напряжений и др.) и технологическое его обеспечение.

7. Нормирование геометрических и физических параметров качества поверхностей с регулярным микрорельефом

Назначение конструктором (нормирование) геометрических и физических параметров качества поверхности — один из важных и весьма ответственных этапов проектирования машин и приборов, связанный с решением сложных задач. Эта сложность обусловлена, с одной стороны, многофакторностью зависимостей и связей служебных свойств деталей с качеством их поверхностей и их малой изученностью, с другой — недостаточным совершенством способов финишной обработки, основанных на резании материалов. Последнее обстоятельство и определило новое направление в решении проблемы повышения точности и надежности нормирования качества поверхности — регуляризацию микрорельефа.

Какие же методы нормирования качества поверхности деталей машин и приборов применяются в практике их проектирования с учетом новых возможностей решения этой задачи, открывшихся в связи с промышленным освоением способов образования регулярных микрорельефов? К ним следует отнести методы нормирования: а) на основе аналитического расчета; б) по прототипу; в) на основе результатов экспериментальных исследований.

Расчетное нормирование. Такой метод нормирования обеспечивает научно обоснованное, а потому надежное и точное нормирование качества поверхности, что определяет его прогрессивность

и перспективность. Однако возможности применения такого метода в конструкторской практике в настоящее время предельно ограничены, что обусловлено перечисленными выше трудностями и главной из них — хаотичностью, нерегулярностью микрорельефов, создаваемых при использовании большинства известных способов финишной обработки материалов. Насколько параметры такого микрорельефа сложно рассчитывать и насколько неточными получаются результаты расчета, можно судить хотя бы по тому, что рассчитанная по известной формуле высота неровностей R ($R = s^2/8r$, где s — подача; r — радиус скругления вершины резца), образующихся при точении, оказывается в 10—15 раз

6. Показатели степени однородности регулярного микрорельефа

Материал	R_{\max}	σR_{\max}	$\frac{\sigma R_{\max}}{R_{\max}} \cdot 100$
Латунь Л62	10	0,30	3,0
Алюминий АМГ	9	0,25	2,8
Сталь 1Х18Н9Т	6	0,19	3,2

меньшей, чем фактическая высота неровностей. Известны модели шероховатых поверхностей [2, 3] с неровностями в виде сферических сегментов, стержней, эллипсов, конусов и т. п. Подобное же разнообразие наблюдается и при определении закона распределения неровностей по высоте [3, 4]. Однако предложенные на основе таких моделей и законов распре-

деления значений параметров микрорельефа шероховатых поверхностей до настоящего времени практически ни в одном случае не реализованы. Затруднения, связанные с переходом на расчетное нормирование качества поверхности, геометрических его параметров, исключаются в случае проектирования деталей с регулярным микрорельефом. Это обусловлено тем, что регулярный микрорельеф при вибронакатывании образован периодически регулярно чередующимися одинаковыми по форме и размерам выступами и впадинами; в результате представляется возможность выделения единичного элемента поверхности и его достаточно точного моделирования. Число выступов и впадин, приходящихся на единицу площади вибронакатанной поверхности, определяется строго аналитически как функция режима обработки. Поэтому возможен аналитический расчет таких важнейших параметров, как фактическая площадь поверхности, число пятен фактического контакта, фактическая площадь контакта. Экспериментальные исследования и анализ большого числа профилограмм поверхностей с регулярным микрорельефом свидетельствуют о том, что такой подход к решению контактных задач на основе регулярности создаваемых вибронакатыванием поверхностей правомерен, так как степень регулярности реальных поверхностей достаточно высока [11, 13]. Результаты исследований и анализ профилограмм показали, что единичные выступы регулярного микрорельефа

(табл. 6) имеют равномерное распределение по высоте; максимальный разброс значений их высот не превышает 3,2 %.

Анализ исследований показал также возможность моделирования единичного выступа поверхности с регулярным микрорельефом вида IV сферическим сегментом (рис. 69, а, б), причем радиус сегмента в случае поверхностей с элементами выпуклой формы с допустимой степенью приближения может быть принят равным радиусу деформирующего элемента.

Таким образом, поверхность с регулярным микрорельефом может рассматриваться как набор идентичных элементарных ячеек, каждая из которых представляет собой сферический сегмент

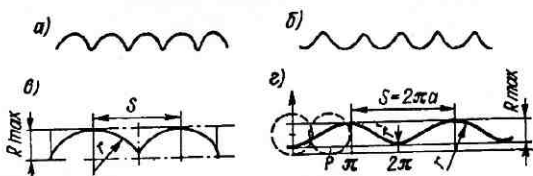


Рис. 69. Моделирование выступа поверхности с регулярным микрорельефом: а, б, в — сферическим сегментом; г — укороченной трохойдой

(рис. 69) [11]. Такая модель, наиболее проста и близка к реальной поверхности с выпуклыми элементами, отвечает требованию универсальности и может быть использована для анализа разных видов взаимодействия твердых тел и твердого тела с различными фазами. Однако ею не исчерпываются возможные варианты моделей регулярных микрорельефов. Поскольку такие микрорельефы характеризуются высокой степенью стабильности профиля, то последний может быть описан функциями аналитического вида. Такие модели особо эффективны при решении контактных задач, связанных с рассеянием и отражением от поверхностей светового потока, теплопередачей, с контактом твердых тел с воздушной средой и газами, с эластичными и т. д.

Правомерность такого моделирования экспериментально проверялась в ЛИТМО Б. Н. Букиным и В. И. Сорокиным для случая рассеяния светового потока от поверхностей с регулярным микрорельефом [11]. Экспериментальные индикатрисы рассеяния сравнивались с рассчитанными по методу касательной плоскости, предложенному акад. Л. М. Бреховских. В основу этого метода расчета положено представление о рассеивающей поверхности, как о поверхности синусоидального профиля.

Поскольку в соответствии с синусоидальной моделью поверхность должна иметь одинаковые радиусы кривизны при вершине и впадине неровностей, а реальные поверхности с регулярным микрорельефом этому условию не удовлетворяют (см. рис. 47), была принята в качестве модели укороченная трохоида (рис. 69, в),

для которой значения радиусов при вершине r и впадине r_1 определялись по формулам:

$$r = \frac{S^2}{2\pi^2 R_{\max}} \left(1 + \frac{R_{\max} \pi}{S} \right)^2; \quad (60)$$

$$r_1 = \frac{S^2}{2\pi^2 R_{\max}} \left(1 - \frac{R_{\max} \pi}{S} \right)^2, \quad (61)$$

Формулы (60) и (61) справедливы для регулярного микро- рельефа с элементами выпуклой формы; для поверхностей с эле- ментами вогнутой формы r должен рассчитываться по формуле (60), а r_1 — по формуле (61).

7. Расчетные и экспериментальные значения параметров микро- рельефа

Номер образца	R_{\max}	S	$r_{\text{расч}}$	r	$\delta, \%$
	мкм				
1	2	200	940	1000	6,0
2	11	350	448	414	7,5

Результаты сопоставления значений радиусов, полученных расчетным путем для поверхностей с регулярным микро- рельефом с элементами вогнутой формы и экспериментально, приведены в табл. 7.

В большом диапазоне изменения номинальных значений параметров регу-

лярных микро- рельефов погрешности расчета не превышали 7,5 %. Как показали исследования, регулярный микро- рельеф столь же однороден и в отношении шага неровностей и их формы, характеризуемой величиной радиусов выступов и впадин и углом наклона образующих. На основе анализа кинематики процесса вибрационного накатывания и принятой модели элемента получена система уравнений, описывающая цилиндрическую поверхность с регулярным микро- рельефом,

$$\left. \begin{aligned} y_y &= r_{\text{ш}} \sin u \cos \frac{\theta}{i} - r_{\text{ш}} \cos u \sin v \sin \frac{\theta}{i} + \cos \frac{\theta}{i} (r_{\text{ш}} + R_y - h); \\ z_y &= z_{\text{ш}} \sin u \sin \frac{\theta}{i} + r_{\text{ш}} \cos u \sin v \cos \frac{\theta}{i} + \sin \frac{\theta}{i} (r_{\text{ш}} + R_y - h); \\ \text{tg } v &= - \frac{ie \sin \theta - \frac{S}{2} \pi}{R_y + r_{\text{ш}} - h}. \end{aligned} \right\} \quad (62)$$

Последнее уравнение в системе (62) является уравнением связи параметров процесса, где $r_{\text{ш}}$ — радиус сферы деформирующего элемента, мм; u, v — угловые параметры точки шара, рад; s — подача, мм/об; e — амплитуда осцилляции, мм; θ — угол поворота оси двигателя осцилляционного движения, рад; $i = \theta/\mu$ — кинематическая характеристика процесса; μ — угол поворота заготовки, рад; R_y — исходный радиус заготовки, мм; h — глубина вдавливания деформирующего элемента в заготовку, мм.

Такое моделирование поверхностей с регулярным микрорельефом носит универсальный характер и может быть применено для описания микрогеометрии не только цилиндрической, но и торцевой, плоской и профильных поверхностей, образуемых не только вибронакатыванием.

Недостатком этого метода моделирования являются конечные зависимости, заданные в параметрическом виде, относительно сложном и неудобном для практических расчетов, требующем использования ЭВМ. Возможно, в дальнейшем будут выявлены другие, более простые методы моделирования поверхностей с регулярным микрорельефом функциями аналитического вида. В настоящее время для решения многих контактных задач наиболее приемлемым и эффективным методом моделирования поверхностей с регулярным микрорельефом, приводящим к более простым и наглядным моделям, следует признать метод моделирования единичной элементарной неровности с последующим распространением ее на всю номинальную поверхность детали.

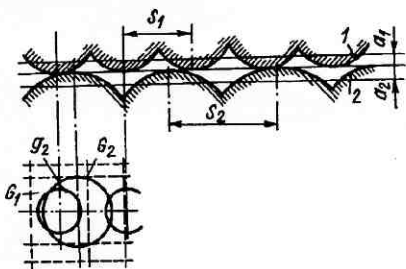


Рис. 70. Схема контактирования двух моделированных поверхностей с регулярным микрорельефом

На основе такого моделирования В. И. Сорокиным разработаны методики расчета числа пятен фактического контакта при контактировании поверхностей с регулярным микрорельефом и фактической площади контакта, и на их основе — методика аналитического расчета контактного термического сопротивления.

На рис. 70 показана схема контактирования двух моделированных поверхностей с регулярным микрорельефом (с выпуклыми элементами), причем шаг неровностей поверхности 2 — S_2 больше шага неровностей поверхности 1 — S_1 ($S_2 > S_1$), а величины сближения поверхностей при приложении внешней нагрузки a_1 и a_2 не равны ($a_1 \neq a_2$).

Для этих условий полное число пятен фактического контакта определяется по формуле

$$n_2 = \frac{A_{g_2}}{A_{G_1}} n_{G_2}, \quad (63)$$

где A_{g_2} — площадь площадки g_2 (рис. 70); A_{G_1} — площадь основания ячейки G_1 ; n_{G_2} — число пятен контакта на элементарной площадке G_2 .

Расчет площади условного эллипса (это понятие предложено Э. В. Рыжовым) поверхности $2(A_{G2})$ может быть выполнен на основании известного решения Герца:

$$A_{G2} = \pi \left[\frac{3pr_2}{4} (1 - \mu^2) \left(\frac{1}{E_1} + \frac{1}{E_2} \right) \right]^{2/3}, \quad (64)$$

где p — нагрузка, приходящаяся на единичный контакт; $r_2 = \sqrt{r_{\text{поп}} r_{\text{прод}}}$ — приведенный радиус при вершине неровностей поверхности 2 ($r_{\text{поп}}$ и $r_{\text{прод}}$ — главные радиусы кривизны эллиптической поверхности выступа); μ — коэффициент Пуассона; E — модуль упругости.

Формула (64) получена для случая контактирования сферы и плоскости; таким образом, условный эллипс заменяется условным кругом. Такая замена, как показано в работе [2, 11], упрощая решение, не вызывает значительной недопустимой ошибки.

Фактическая площадь контакта плоской поверхности с регулярным микрорельефом с плоской гладкой поверхностью при упругом контакте определяется по формуле

$$A_r = \pi K_1^2 K_2^2 \sqrt[3]{\frac{9}{16} \pi^2 N^2 r n_r (v_1 + v_2)^2}, \quad (65)$$

где K_1 — коэффициент, учитывающий взаимное влияние деформируемых элементов; K_2 — коэффициент, учитывающий наличие тангенциальных смещений; N — номинальная нагрузка на контакт; r — радиус выступов регулярного микрорельефа; n_r — число пятен фактического контакта;

$$v_1 = (1 - \mu_1^2)/(\pi E_1); \quad v_2 = (1 - \mu_2^2)/(\pi E_2). \quad (66)$$

μ_1, μ_2 — коэффициенты Пуассона контактирующих металлов; E_1, E_2 — модули упругости контактирующих материалов;

$$K_1 = 1 + \frac{\pi^2}{6} \left(\frac{a}{S_1} \right)^2, \quad (67)$$

где a — площадь единичного пятна контакта; S_1 — шаг неровностей регулярного микрорельефа по вершинам;

$$a = \sqrt[3]{\frac{3}{4} P \pi r_1 (v_1 + v_2)}, \quad (68)$$

где $P = N/n_2$ — нагрузка на единичном контакте;

$$n_2 = W_1 A_a, \quad (69)$$

где W_1 — плотность выступов неровностей регулярного микрорельефа;

$$K_2 = \sqrt[3]{1 + f \frac{3\pi(4 + \mu)}{8(1 - 2\mu)}}. \quad (70)$$

Здесь f — коэффициент трения покоя.

Фактическая площадь контакта плоской поверхности с регулярным микрорельефом с плоской гладкой поверхностью при пластическом контакте определяется по формуле

$$A_2 = \pi K_1^2 K_2^2 \sqrt{\frac{9}{16} \pi^2 N^2 r_1^2 r_2^2 n_2 \left(\frac{v_1 + v_2}{r_1 + r_2} \right)^2}, \quad (71)$$

где r_2 — радиус выступов гладкой поверхности.

Фактическая площадь контакта двух плоских поверхностей с регулярным микрорельефом при упругом контакте определяется по формуле

$$A_2 = \pi K_1^2 K_2^2 \sqrt{\frac{9}{16} \pi^2 N^2 r_1^2 r_2^2 n_2 \left(\frac{v_1 + v_2}{r_1 + r_2} \right)^2}, \quad (72)$$

где r_2 — радиус выступов второй поверхности с регулярным микрорельефом.

Фактическая площадь контакта двух плоских поверхностей с регулярным микрорельефом при пластическом контакте определяется по формуле

$$A_2 = \frac{N}{HB}, \quad (73)$$

где HB — твердость по Бринелю менее твердого из контактирующих тел;

$$N = \frac{P_1}{n_2}. \quad (74)$$

Пример. Рассчитать параметры регулярного микрорельефа упругого контакта торцевой поверхности с регулярным микрорельефом с гладкой плоской поверхностью с номинальной площадью $A_a = 100 \text{ мм}^2$ при номинальной нагрузке $N = 1962 \text{ Н}$ и фактической площадью контакта A_2 , равной $0,06 A_a$. Материал контактирующих деталей — конструкционная сталь ($HB = 3 \cdot 10^7 \text{ Па}$), $\mu_1 = \mu_2 = \mu = 0,30$; $E_1 = E_2 = 196220 \text{ МПа}$; $f = 0,15 \text{ мм}$.

Принимаем: $W_1 = 200 \text{ мм}$ и $r_1 = 0,6 \text{ мм}$, тогда $n_2 = 20 \cdot 100 = 2000$; $P = 1,1 \text{ Н}$; $K_1 = 1,136$; $a = 0,02$; $s_1 = 0,07 \text{ мм/сб}$.

Расчетные параметры регулярного микрорельефа обеспечиваются при следующем режиме вибронакатывания: $t = 28,36$; $s_{\text{вп}} = 0,078 \text{ мм/об}$; $e = 0,5 \text{ мм}$; $d_{\text{ш}} = 4,0 \text{ мм}$; $P = 245 \text{ Н}$.

Поскольку параметры регулярного микрорельефа являются функцией режима обработки, конструктор может нормировать их, задавая в чертеже параметры режима обработки.

Экспериментальная проверка результатов большого числа расчетов фактической площади контакта показала, что их точность вполне достаточна для инженерной практики. В частности, это было подтверждено и при расчете фактической площади контакта при расчете контактного термического сопротивления для различных условий контактирования.

Методика расчета контактного термического сопротивления для различных условий контактирования. В основу этой методики положены механическая модель контакта поверхностей с регулярным микрорельефом (рис. 71, а), модель элементарной ячейки контакта микрорельефа с регулярным микрорельефом (рис. 71, б)

и тепловая модель контакта поверхностей с регулярным микро- рельефом (рис. 72). На базе этих моделей первоначально произ- водился расчет контактного сопротивления элементарной ячейки контакта, затем числа элементарных ячеек и на основе этих расче- тов определялось контактное термическое сопротивление контакта.

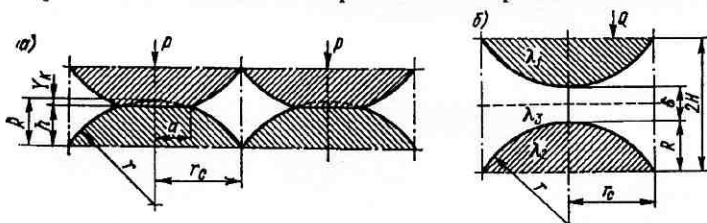


Рис. 71. Модели контакта поверхностей с регулярным микро- рельефом

Полное построение методики расчета контактного термического сопротивления поверхностей с регулярным микро- рельефом выполнено В. И. Сорокиным, здесь же представлены окончательные формулы расчета для двух случаев контактирования: 1) контакти- рующие неровности образуют пятно контакта радиуса a ; 2) между неровностями — зазор размером δ (рис. 71, б). Термическое сопротивление половины ячейки регулярного микро- рельефа кон-

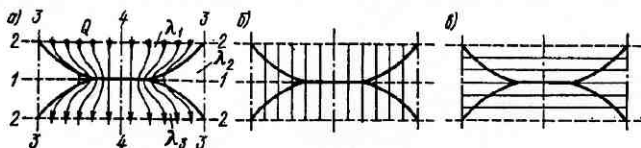


Рис. 72. Тепловая модель контакта поверхностей с регулярным микро- рельефом: а — реальное расположение линий тока в эле- ментарной ячейке контакта; б — дробление модели системой адиабатных поверхностей; в — дробление модели системой изо- термических поверхностей

тактирующей поверхности для первого случая (рис. 71, а) опре- деляется по формуле

$$Ra_{0,5} = \left\{ \frac{2\pi r \lambda_1 \lambda_2}{\lambda_1 - \lambda_2} \left[\sqrt{1 - \left(\frac{r_c}{r}\right)^2} - \sqrt{1 - \left(\frac{a}{r}\right)^2} + \right. \right. \\ \left. \left. + \frac{A}{r} \ln \frac{\frac{A}{r} - \sqrt{1 - \left(\frac{a}{r}\right)^2}}{\frac{A}{r} - \sqrt{1 - \left(\frac{a}{r}\right)^2}} \right] + \frac{\lambda_1 \pi a^2}{h} \right\}^{-1} ; \quad (75) \\ A = \frac{h \lambda_1}{\lambda_1 - \lambda_2} + r - R;$$

для второго случая, когда поверхности разделены зазором (рис. 71, б),

$$Ra_{0,5} = \left\{ \frac{2\pi r \lambda_1 \lambda_2}{\lambda_1 - \lambda_2} \left[\sqrt{1 - \left(\frac{r_c}{r}\right)^2} - 1 + \frac{A'}{r} \ln \frac{A' - \sqrt{1 - \left(\frac{r_c}{r}\right)^2}}{A' - 1} \right] \right\}^{-1}; \quad (76)$$

$$A' = \frac{H\lambda_1}{\lambda_1 - \lambda_2} + r - R. \quad (77)$$

Термическое сопротивление другой половины ячейки регулярного микрорельефа контактирующей поверхности для первого случая определяется по формуле

$$R_{u,0,5} = \frac{1}{2\pi B(\lambda_1 - \lambda_2)} \ln \frac{(r - Y_K + B)(R - r + B)}{(Y_K - r + B)(r - R + B)}; \quad (78)$$

для второго случая, когда поверхности разделены зазором (рис. 71, б),

$$R_{u,0,5} = \frac{1}{2\pi B(\lambda_1 - \lambda_2)} \ln \frac{(B + r)(B - r + H)}{(B - r)(B + r - H)}; \quad (79)$$

$$B = \left(r^2 + \frac{\lambda_2 r_c^2}{\lambda_1 - \lambda_2} \right)^{0,5}. \quad (80)$$

Термическое сопротивление ячейки регулярного микрорельефа

$$R_{я} = Ra_{0,5} + R_{u,0,5}. \quad (81)$$

Термическое сопротивление контакта

$$R_K = \frac{R_{я}}{n_r}, \quad (82)$$

где n_r — число пятен контакта, а исходные для расчета данные определяются из зависимостей (рис. 71 и 72):

$$\lambda_1 = \frac{2\lambda_{11}\lambda_{12}}{\lambda_{11} + \lambda_{12}}; \quad (83)$$

$$r = 0,5(r_1 + r_2); \quad (84)$$

$$R = 0,5(R_1 + R_2), \quad (85)$$

где λ_{11} , λ_{12} — теплопроводности материалов контактирующих деталей; r_1 , r_2 — приведенные радиусы при вершинах неровностей контактирующих поверхностей $r_i = \sqrt{r_{\text{поп}} r_{\text{прод}} i}$; R_1 , R_2 — высоты неровностей контактирующих поверхностей.

За расчетное значение шага S берется значение, наибольшее из всех значений шага по поверхности контакта. Для выполнения расчетов по данной методике разработаны алгоритмы и программа на ЭВМ «Мир-1». Выполненное проверочное экспериментальное определение контактного термического сопротивления выявило высокую точность расчетов, намного превышающую точность

ранее выполнявшихся расчетов для контакта шероховатых поверхностей. Аналитические расчеты обеспечения служебных свойств контактирующих поверхностей деталей машин и приборов создают предпосылки надежного нормирования микрогеометрии поверхностей за счет назначения конструктором не только номинальных значений параметров микрорельефа, но и технически

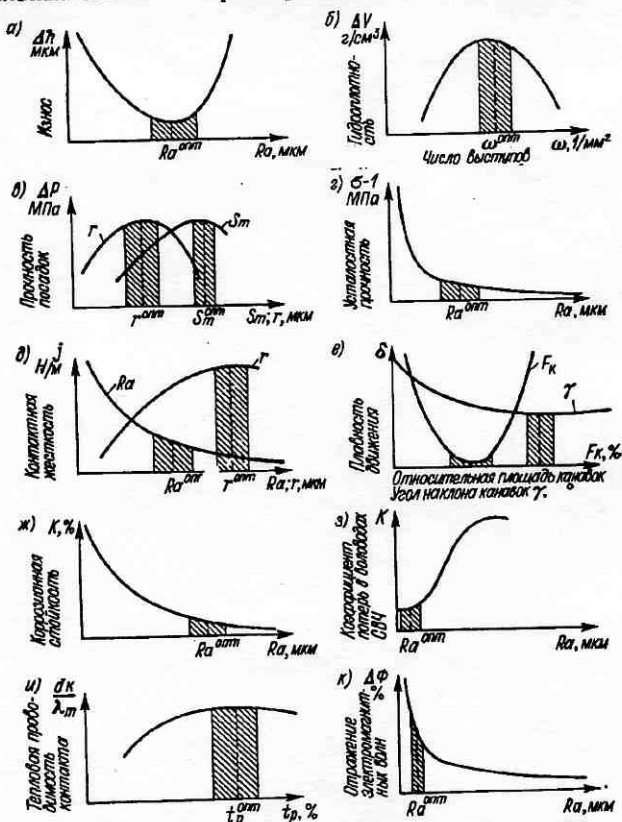


Рис. 73. Типовые графики зависимостей эксплуатационных свойств деталей машин и приборов от их микрогеометрии

обоснованных и экономически целесообразных допусков. Последнее обстоятельство весьма существенно. Несмотря на то, что в ГОСТ 2789—73 впервые и вполне обоснованно указывается, что при нормировании номинальных числовых значений параметров шероховатости должны быть установлены допустимые отклонения (из ряда 10; 20; 40 %), в практике проектирования машин и приборов это положение до сих пор фактически не реализуется.

Из анализа лишь некоторых типовых графиков зависимостей эксплуатационных свойств деталей машин и приборов от их микрогеометрии, приведенных на рис. 73, а—к, и результатов большого числа исследований следует, что связь параметров микро рельефа поверхностей с важнейшими их эксплуатационными свойствами в большинстве случаев нелинейна, а оптимальные значения параметров лежат в весьма узких пределах. Это предопределяет необходимость нормирования значений параметров микрогеометрии с указанием допустимых их отклонений. Трудности такого нормирования, о которых говорилось выше, практически полностью исключаются при переходе от шероховатых поверхностей к поверхностям с регулярными микро рельефами, параметры которых могут нормироваться расчетными методами.

Таким образом, переход на расчетный метод нормирования микрогеометрии является в настоящее время основным наиболее прогрессивным и эффективным направлением.

Нормирование по прототипу. Способ нормирования состоит в том, что конструктор пытается найти прототип проектируемой им детали, идентичной ей по назначению и условиям эксплуатации, конструкции, материалу, термической и гальванической обработке и другим характеристикам, и убедившись в том, что такая деталь удовлетворяет всем предъявляемым к ней требованиям, нормирует качество поверхности проектируемой детали аналогично прототипу.

Выполнение условия полной идентичности практически во всех случаях обязательно и именно это требование резко ограничивает возможности широкого использования этого способа нормирования в конструкторской практике. Это объясняется тем, что при создании новых конструкций машин и приборов их технико-экономические характеристики изменяются, требования к ним повышаются, что не может не отразиться на конструкции самих машин и приборов, а следовательно, и на конструкции однотипных деталей и, как следствие, на изменении требований к качеству их поверхностей. Корректировка требований к качеству поверхности определяет необходимость проведения подчас сложных и трудоемких исследований и тогда второй способ нормирования по прототипу переходит в третий способ. Особенно большие трудности при малой степени надежности такой, к сожалению, пока еще широко практикуемый способ нормирования, вызывает при создании шероховатых поверхностей, повторное воспроизведение микрогеометрии и физических параметров которых весьма сложно и ненадежно.

Значительно проще и надежнее нормирование по прототипу качества поверхностей с регулярным микро рельефом, поскольку геометрические параметры качества поверхности связаны и аналитически определяются параметрами режима обработки, которые уже для большого числа поверхностей деталей машин и приборов выявлены и зафиксированы в различных материалах [15].

В них содержатся данные многолетних исследований (проводились в течение более 18 последних лет), выявивших зависимости ряда эксплуатационных свойств (износостойкости, гидроплотности, виброустойчивости, усталостной прочности, плавности хода и др.) от параметров режима процесса вибронакатывания. Там же приведены как оптимальные виды регулярного микрорельефа, так и значения F_k для частично регулярных и R — для регулярных микрорельефов.

Однако и при регулярных микрорельефах недостатки метода нормирования качества поверхности по прототипу и условия, ограничивающие его использование, в основном не исключаются. Именно это определяет как основной, наиболее надежный метод нормирования качества поверхности — проведение экспериментальных исследований с целью выявления комплекса требующих нормирования параметров и оптимальных их значений.

Нормирование по результатам экспериментальных исследований. Поскольку расчетный метод лишь только начинает разрабатываться и входить в практику нормирования, а метод прототипа, как указывалось выше, не точен, основным, хотя и относительно трудоемким и дорогостоящим, является метод нормирования на основе результатов экспериментальных исследований, выполненных с целью выявления оптимального микрорельефа поверхности. Подобные исследования выполняются в следующей последовательности.

Первоначально ориентировочно выбираются вид регулярного микрорельефа и данные о значениях параметров (см. гл. III). Далее, на основе обобщенных результатов ранее выполненных исследований и опыта эксплуатации машин и приборов с деталями с регулярным микрорельефом, приведенных в табл. 1, 2, на рис. 73, в зависимости от служебных свойств поверхности, которые необходимо обеспечить, ориентировочно выбирается комплекс параметров регулярного микрорельефа. Этот комплекс параметров должен удовлетворять трем требованиям: 1) наиболее полно и точно отражать связи микрогеометрии с требуемыми служебными ее свойствами; 2) число нормируемых параметров должно быть минимальным; 3) в комплекс должны по возможности входить параметры, наиболее просто и экономично технологически обеспечиваемые и контролируемые.

Как видно из рис. 73, зависимость между параметрами микрорельефа, а соответственно и параметрами режима обработки нелинейна, поэтому необходимо выбирать такой диапазон значений исследуемых параметров регулярного микрорельефа или параметров режима, обеспечивающего его образование, чтобы найти экстремальное их значение. Примеры некоторых результатов таких исследований в виде экспериментальных графиков зависимости характеристик трения и износа от величины площади F_k приведены на рис. 74. Такого рода результаты экспериментальных исследований являются наиболее точными и надежными

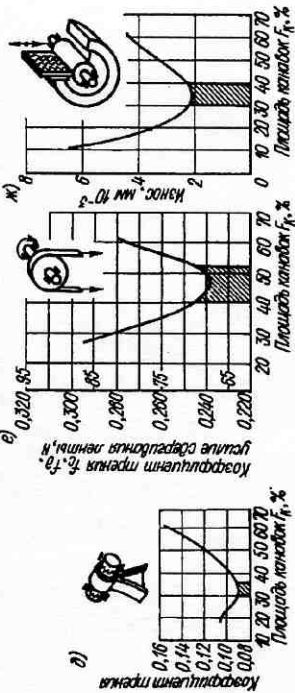
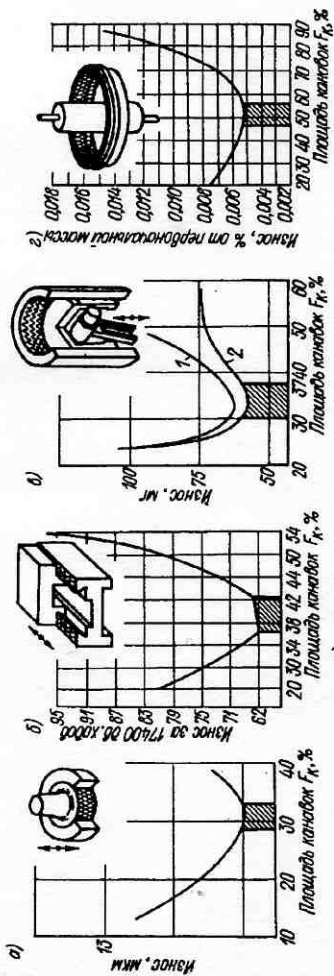


Рис. 74. Графики зависимости характеристики трения и износа от площади, занимаемой канавками частично регулируемого микрорельефа: а — калибр-деталь; б — направляющая каретка; в — гильза — поршневое кольцо; г — кольцо — бегунок; д — вал — подшипник; е — диск — лента; ж — лопастная часть — направляющие;

1 — поршневое кольцо; 2 — гильза

данными для конструктора при нормировании параметров регулярного микрорельефа. В тех случаях, когда они не могут быть использованы конструктором при проектировании деталей без корректировок и дополнительных экспериментальных исследо-

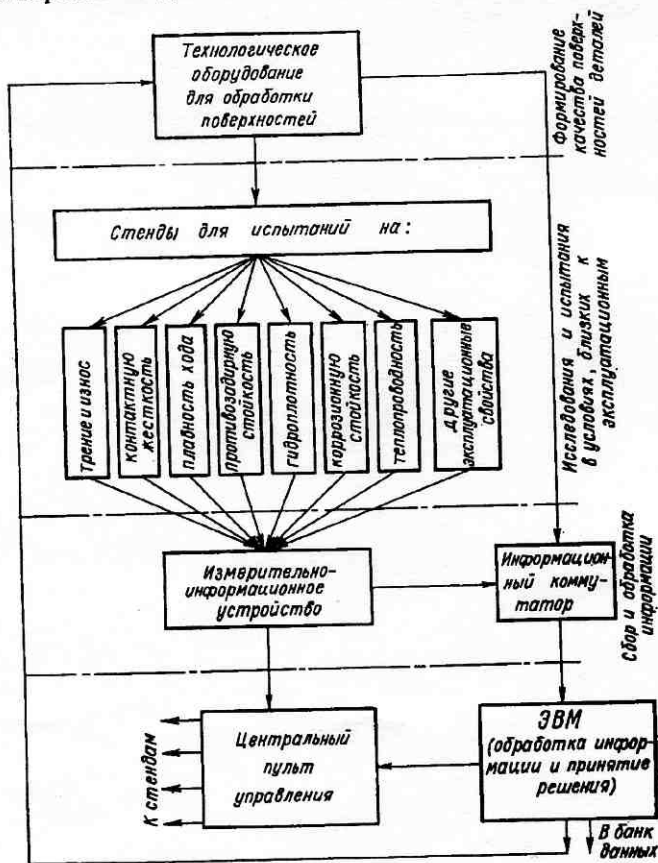


Рис. 75. Блок-схема стенда-комбайна для экспериментальных исследований эксплуатационных свойств деталей с регулярным микрорельефом

ваний, их можно применить как исходные, ориентировочные с последующей проверкой в условиях эксплуатации, а также при планировании экспериментов.

Достоинством нормирования качества поверхности на основе данных экспериментальных исследований является выявление одновременно с оптимальными значениями параметров микро-

рельефа условий и режима технологического его обеспечения (табл. 8).

В настоящее время в ЛИТМО создается стенд-комбайн для экспериментальных исследований эксплуатационных свойств деталей машин и приборов, как функции параметров регулярных микрорельефов и режима процесса вибронакатывания с банком накопления информации. Блок-схема стенд-комбайна показана на рис. 75.

8. Технологическое обеспечение и контроль регулярных микрорельефов

Технологическое обеспечение и контроль регулярных микрорельефов имеют ряд особенностей по сравнению с нормированием, технологическим обеспечением и контролем шероховатых поверхностей. Эти особенности обусловлены, в первую очередь, упорядоченной пластической деформацией при их образовании, аналитически определяемыми зависимостями между кинематикой процессов их образования и параметрами микрогеометрии, возможностями управления и регулирования режимом обработки поверхностей.

Технологическое обеспечение регулярных микрорельефов. Оно может осуществляться тремя основными методами: на основе аналитического расчета; по прототипу; на основе результатов экспериментальных исследований.

Расчетное технологическое обеспечение. Этот метод при образовании регулярных микрорельефов основан на кинематических связях режима обработки с параметрами (см. п. 6), причем в данном случае решаются обратные задачи: по заданным значениям параметров микрорельефа определяются значения параметров режима, например процесса вибронакатывания.

Расчет технологического обеспечения образования частично регулярных микрорельефов с элементами вогнутой формы. Наиболее известными и широко используемыми в промышленной практике и при исследованиях являются два подхода к разработке методики подобных расчетов¹:

1) основанный на упрощенной математической модели процесса образования частично регулярного микрорельефа при вибронакатывании, рассматривающей отпечаток деформирующего элемента при вдавливании его в обрабатываемую поверхность как близкий к круговому (см. рис. 58, а);

2) основанный на более точной модели процесса, рассматривающей указанный отпечаток как эллиптический.

Первая методика (на базе кругового отпечатка) и типовой пример ее применения для расчетного технологического обеспечения

¹ Методики разработаны Я. С. Фельдманом.

образования частично регулярного микрорельефа приведен в работе [15]. Недостатком этой методики является зависимость точности расчета от типа цилиндрической поверхности (наружная или внутренняя), отношения d_m/d_a и угла сетки α . Для наружной цилиндрической поверхности при $d_m/d_a < 0,1$ и $0 < \alpha < 30^\circ$ относительная погрешность по сравнению с формулами, полученными на базе эллиптического отпечатка [12], не превышает 5%.

Для получения точной формулы расчета F_k по второй методике на базе эллиптического отпечатка и возможности табулирования соответствующих расчетов введены [12] обобщенные безразмерные параметры μ и δ , определяемые следующими равенствами:

$$\mu = \frac{\rho}{s} = \frac{\sqrt{d_m h}}{s}; \quad \delta = \frac{2li}{d_a \rho} = \frac{2li}{\sqrt{d_a (d_a \pm d_m)}}, \quad (86)$$

где ρ и τ — соответственно вертикальная и горизонтальная полуоси эллиптического отпечатка.

В последней формуле знаки (+) и (−) отвечают вибронакатыванию соответственно наружных и внутренних цилиндрических поверхностей. Эти параметры имеют простой геометрический смысл: μ есть отношение наименьшей полуширины канавки к величине подачи и характеризует заполненность канавками вибронакатанной поверхности цилиндра в направлении подачи; параметр δ можно представить в виде $\delta = \operatorname{tg} \alpha K_{сж}$, где α — угол сетки; $K_{сж} = \tau/\rho$ — отношение полуосей эллиптического отпечатка. Параметр δ характеризует заполненность вибронакатанной поверхности канавками в направлении, перпендикулярном направлению подачи. Выражая F_k через μ и δ , приходим к следующим формулам:

$$F_k^{(1)} = \frac{400\mu}{\pi} \sqrt{1 + \delta^2} E\left(\frac{\delta^2}{1 + \delta^2}\right) = \frac{400\mu}{\pi} \int_0^{\frac{\pi}{2}} \sqrt{1 + \delta^2 \cos^2 \varphi} d\varphi. \quad (87)$$

Формула (87) табулирована [12, 13]

$$F_k^{(2)} = F_k^{(1)} K_{1 \rightarrow 2}; \quad (88)$$

$$F_k^{(3)} = F_k^{(1)} K_{1 \rightarrow 3}, \quad (89)$$

где

$$K_{1 \rightarrow 2} = 1 - \frac{8d_a l R^2}{3\rho \sqrt{d_a^2 + 1,6l^2 i^2}}; \quad K_{1 \rightarrow 3} = 1 - \frac{4\rho i}{\pi \sqrt{d_a^2 + 1,6l^2 i^2}}; \quad (90)$$

$$R = \sqrt{\{i\} - \{i\}^2 + \frac{2\rho - s}{8l}}. \quad (91)$$

Формулы для технологического обеспечения заданной величины F_k получаются из формул (86)–(88). Они также табулированы [12, 13].

При расчетном технологическом обеспечении частично регулярного микрорельефа приходится решать следующие типовые задачи [12].

Задача 1. Заданы тип цилиндрической поверхности, вид микрорельефа и значения его параметров. Исходя из возможностей оборудования и оснастки, требуется найти значения параметров режима, при которых образуется требуемый вид микрорельефа со значениями указанных его параметров из заданных полей допусков этих величин.

Составными элементами решения задачи 1 являются задачи 2 и 3.

Задача 2. Даны значения параметров режима вибронакатывания. Проверить, обеспечивают ли они образование микрорельефа требуемого вида.

Задача 3. Указаны тип цилиндрической поверхности (наружной или внутренней), значения параметров режима вибронакатывания и вид микрорельефа, образуемого при этом режиме. Вычислить соответствующие значения параметров частично регулярного микрорельефа.

Задача 1 решается методом, объединяющим метод последовательного приближения, метод перебора и расчет по таблицам и формулам. Для наглядности и удобства решения таких задач соответствующие алгоритмы представлены в виде рабочих блок-схем [12]. Алгоритмы решения задач 2 и 3 представляются соответствующими частями этих блок-схем.

На рис. 76 представлена блок-схема алгоритма технологического обеспечения заданных глубин и относительной площади F_k канавки для микрорельефа вида I.

Пояснения к блок-схеме составлены в расчете на использование специализированных таблиц [13].

Блок 1. По чертежу или плану эксперимента определяются T -тип цилиндрической поверхности: наружная H (например, вал) или внутренняя B (например, гильза, втулка), вид микрорельефа, диаметр d_3 заготовки, глубина h и относительная площадь F_k канавки. Имеющиеся оборудование и оснастка определяют: диаметр $d_{ш}$ деформирующего элемента, амплитуду осцилляции e , технологически достижимые значения i_j и s_k параметра i и задачи s .

Величины h и F_k указываются с соответствующими допусками.

Блок 2. Начальное значение i выбирается из множества $\{i_1, i_2, \dots, i_p\}$ технологически достижимых на данном оборудовании значений i . Для сокращения вычислений целесообразно для микрорельефа вида I выбирать в качестве начального такое значение i , у которого дробная часть $\{i\}$ близка к нулю.

Блок 5. Для вычисления $\sin \pi \{i\}$ используется табл. 18 работы [13].

Блок 8. Расчет A производится по табл. 2 работы [13].

Блок 9. Расчет A производится по табл. 3 работы [13].

Блок 10. Величина μ_0 находится по табл. 5 из работы [13].

Блок 14. Величина F_k^* находится по табл. 4 из работы [13].

Блок 18. Шаг e варьирования глубины канавки определяется ценой одного или нескольких делений микрометрического винта, регулирующего усилие вдавливания шара в заготовку.

Пример. Найти параметры режима вибронакатывания вала диаметром $d_3 = 20$ мм, при котором образуется микрорельеф вида I с глубиной канавки 10 ± 1 мкм и относительной площадью канавки $(40 \pm 3) \%$.

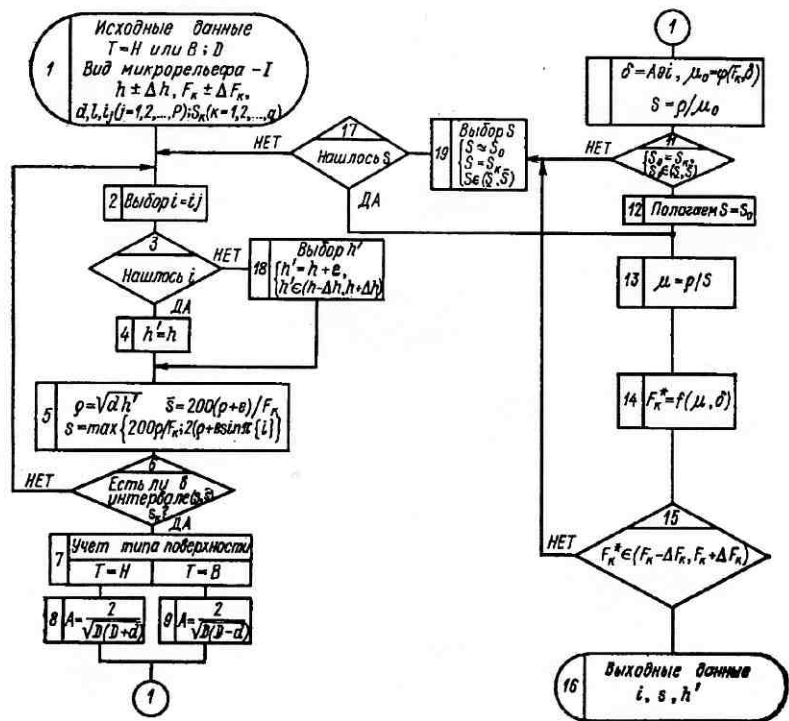


Рис. 76. Блок-схема алгоритма технологического обеспечения значений F_k и h_k для частично регулярного микрорельефа вида I

Решение. Пусть вибронакатывание выполняется на станке 1К62 виброголовкой с диаметром шара $d_{ш} = 4$ мм и амплитудой осцилляции $e = 1$ мм, на которых могут быть технологически обеспечены следующие значения подачи s и параметра i : $s = 0,70; 0,78; 0,87; 0,95; 1,04; 1,14; 1,21; 1,40; 1,56; 1,74; 1,91; 2,08; 2,50; 3,00; 3,50; 4,00; 4,50; 5,00; 5,50; 6,00$ мм/об; $i = 5,6; 7,0; 8,99; 11,2; 17,5; 22,4; 28,0; 35,0; 44,44; 56,0; 70,0; 88,88; 112,0; 140,0$.

1. Выбираем такое значение i (рис. 76), для которого $\{i\} = 0$, например $i = 7$.

2. В качестве h берем $h' = h = 10$ мкм.

3. Вычисляем $\rho = \sqrt{d h} = \sqrt{4 \cdot 0,010} = 0,2$ мм.

4. Вычисляем \underline{s} и \bar{s} :

$$\underline{s} = \max \left\{ \frac{200}{F_K}; 2(\rho + \varepsilon \sin \pi) (i) \right\} = \max \{1; 0,4\} = 1 \text{ мм/об};$$
$$\bar{s} = \frac{200(\rho + \varepsilon)}{F_K} = \frac{200(0,2 + 1)}{40} = 6 \text{ мм/об}.$$

5. Сравниваем полученный промежуток $(s; \bar{s}) = (1; 6)$ с технологически достижимыми значениями подачи и видим, что в промежутке $(1; 6)$ находятся следующие значения подачи:

$$1,04; 1,14; 1,21; 1,40; 1,56; 1,74; 1,91; 2,08; 2,50;$$
$$3,00; 3,50; 4,00; 5,00; 5,50. \quad (92)$$

6. Так как обрабатывается наружная цилиндрическая поверхность вала ($T = H$), то по табл. 2 из [13] при $d_3 = 20$ мм, $d_{\text{ш}} = 4$ мм находим $A = 0,091$ 1/мм.

7. Вычисляем $\delta = Ai = 0,091 \cdot 1,7 \approx 0,6$.

8. По табл. 5 из [13] (блок 5.2) находим

$$\mu_0 = \varphi(F_K, \delta) = \varphi(40; 0,6) = 0,184.$$

9. Вычисляем

$$s_0 = \frac{\rho}{\mu_0} = \frac{0,2}{0,184} = 1,087 \text{ мм/об}.$$

10. Так как найденное значение s_0 не совпадает с технологически достижимыми, то выбираем из множества (92) ближайшее к s_0 , т. е. полагаем $s = 1,04$ мм/об.

11. Вычисляем $\mu = \frac{\rho}{s} = \frac{0,2}{1,04} = 0,192$.

12. По табл. 4 из [13] (блок 4.10) находим

$$F_K^* = f(\mu, \delta) = f(0,192; 0,6) = 41,65 \%$$

13. Так как найденное значение F_K^* лежит в заданном поле допуска величины F_K , т. е. в промежутке 37÷43 %, то найденные значения параметров режима вибронакатывания удовлетворяют условиям поставленной задачи.

О т в е т: $i = 7$; $\varepsilon = 1,04$ мм/об; $h' = 10$ мкм.

При отсутствии у технолога специализированных таблиц [13] расчет может производиться по первой методике на базе кругового отпечатка с определением возникающей при таком расчете погрешности по графикам (рис. 77). Рассмотрим пример определения величины погрешности при расчете F_K на базе кругового отпечатка (рис. 77, а).

Пусть вибронакатыванием обрабатывается наружная цилиндрическая поверхность диаметром $d_3 = 20$ мм, шаром $d_{\text{ш}} = 4$ мм, т. е. $d_{\text{ш}}/d_3 = 0,2$ с образованием частично регулярного микрорельефа вида I с углом сетки $\alpha = 64^\circ$. На графике (рис. 77, а) находим точку с координатами $d_{\text{ш}}/d_3 = 0,2$, $\alpha = 64^\circ$, которой соответствует величина относительной погрешности, по сравнению с расчетом по точной формуле на базе эллиптического отпечатка, находящегося в промежутке 10—15 %.

Расчет технологического обеспечения образования регулярного микрорельефа с элементами выпуклой формы. Особенность этого расчета обусловлена тем, что в отличие от вибронакатанного микрорельефа образуется как негативный отпечаток микрорельефа

валка при холодной прокатке листа, ленты или детали. Следовательно, технологическое обеспечение образования такого микрорельефа сводится к созданию на прокатных валках микрорельефа, негативного относительно требуемого с элементами вогнутой

формы при условии полной его отпечатываемости на обрабатываемой поверхности.

В основу методики расчета (предложена М. В. Джаникашвили) положена следующая посылка: при преобразовании вращательного движения в прямолинейное возвратно-поступательное кривошипно-шатунным механизмом виброголовки, след перемещения деформирующего элемента моделируется с некоторым допущением симметричной пилообразной кривой.

В табл. 8 сведены формулы, определяющие условия и режим образования частично регулярного микрорельефа вибронакатыванием на прокатных валках, а также его параметры. Экспериментальной проверкой установлено, что относительная погрешность расчетных и воспроизведенных по их

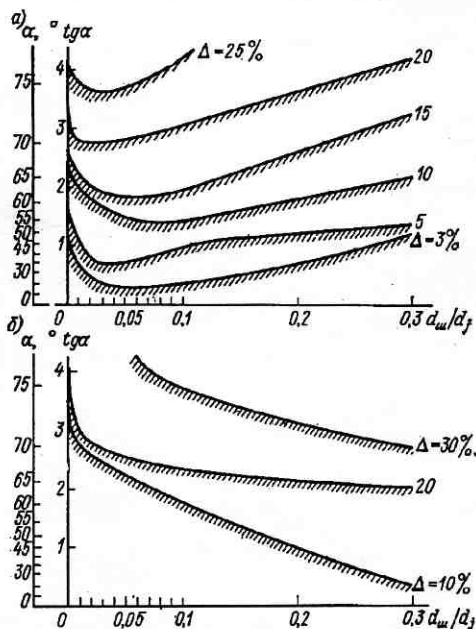


Рис. 77. Графики оценки относительной погрешности, возникающей при расчете параметров частично регулярного микрорельефа на базе кругового отпечатка по сравнению с расчетами по таблицам, составленным на базе эллиптического отпечатка: а — наружная поверхность; б — внутренняя

данным значений параметров регулярных микрорельефов весьма мала и допустима практически для всех случаев промышленной практики.

Так, отклонения расчетных значений длины волны λ , фазового угла β , сдвига по фазе ζ , относительной площади, занимаемой канавками F_k , не превышает 8%, а $i = n_{дв. х}/n_3$ и угла сетки α — 12%.

После проектирования и изготовления прокатных валков для образования регулярного микрорельефа с элементами выпуклой формы необходимо установить режим прокатки, обеспечивающий полную отпечатываемость микрорельефа валка на прокатываемой

8. Формулы расчета параметров режима вибронакатывания прокатных валков с частично регулярным микрорельефом и его параметров

Расчетные параметры	Формулы для расчета
Длина волны	$\lambda = \frac{\pi d_3}{i}$ (93)
Угол сетки	$\alpha = \text{arctg} \frac{4e}{\lambda}$ (94)
Фазовый угол	$\beta = \text{arctg} \frac{\varphi \lambda}{s}$ (95)
Сдвиг по фазе	$\varphi = \frac{s \text{tg} \beta}{\lambda}$ (96)
Площадь волны канавки для вида I	$s_{KI} = \frac{\lambda \rho}{\cos \alpha}$; $s_{KI} = \frac{4e \rho}{\sin \alpha}$; $s_{KI} = V_{ш} \frac{60}{n_{дв}} \rho$ (97)
Площадь волны канавки для вида II	$s_{KII} = \frac{\lambda \rho}{\cos \alpha} - \rho \left(\frac{2e - s_n}{\sin \alpha} \right)$ (98)
Площадь волны канавки для вида III	$s_{KIII} = \frac{\lambda \rho}{\cos \alpha} - \frac{2\rho^2}{\sin \gamma \cos \alpha}$ (99)
Относительная площадь канавки	$F_K = \frac{s_{KI}}{\pi d_3 s}$; $F_K = \frac{V_{ш} 60 \rho}{n_3 \pi d_3 s} 100$ (100)
Подача	$s = \frac{s_{KI}}{\theta \pi d_3}$, где $\theta = 0,01 F_K$ (101)
Условия образования вида I РМР	$0 < \{i\} < \frac{s \text{ctg} \alpha}{\lambda}$ (102)
Условия образования вида II РМР	$\{i\} = \frac{s \text{ctg} \alpha}{\lambda}$ (103)
Условия образования вида III РМР	$\frac{s \text{ctg} \alpha}{\lambda} < \{i\} < 1$ (104)

поверхности. Такой режим обрабатывается опытным путем и определяется свойствами обрабатываемого материала, исходной толщиной листа и, в меньшей степени, зависит от значений параметров формируемого микрорельефа. Экспериментальное выявление режима и условий прокатки не сложно и относительно не трудоемко. Ниже приведены результаты исследования¹ процесса прокатки в вибронакатанных валках с образованием частично регулярного и регулярного микрорельефов для наиболее харак-

¹ Выполнено М. В. Джаникашвили.

терных материалов, выпускаемых прокатным производством: сталь 45, стали 08кп, Х18Н9Т, АМГ-2 толщиной 1,0; 1,5; 1,6 мм. Прокатка производилась на малогабаритном стане (диаметр валков 115 мм, длина бочки 100 мм, оба валка приводные, скорость прокатки $v = 13$ м/с). Микрорельеф на валках из стали ХВГ (НВ 237) рассчитывался по формулам, приведенным в табл. 8, и вибронакатывался на токарном станке 1К62. Листовые образцы прокатывались при различных значениях относительного обжатия $\epsilon = \frac{H_0 - H_1}{H_0} 100$, последовательно возрастающей до достижения

максимального значения коэффициента отпечатываемости $K = \frac{R_n}{R_b}$ (H_0 и H_1 — соответственно толщина листа до и после прокатки, мм; R_n и R_b — высоты неровностей листа и валка).

При прокатке без смазки микрорельеф валка более точно отпечатывается на листе, чем при прокатке со смазкой. Смазывающее вещество, адсорбируясь на рабочих поверхностях заготовки и инструмента, несколько препятствует затеканию металла в углубления неровностей, что снижает отпечатываемость микрорельефа. Поэтому для образования на образцах полностью отпечатанного микрорельефа валков при прокатке со смазкой необходимы более высокие значения степени деформации. Так, если для стали 08кп $H_0 = 1,5$ мм коэффициент отпечатываемости $K = 0,96$ достигается при $\epsilon = 9,2$ %, то при введении смазки в зону прокатки при $\epsilon = 10,8$ % $K = 0,92$ и снижение отпечатываемости при прокатке с введением смазки составляет 8—10 %.

Коэффициент отпечатываемости K в значительной мере зависит от толщины ленты. Экспериментальными исследованиями показано, что если толщина полосы $H_0 = 1$ мм (сталь 08кп; прокатка без смазки) коэффициент отпечатываемости $K = 0,96$ достигается при $\epsilon = 7,2$ %, то при толщине полосы $H_0 = 1,5$ мм $K = 0,96$ достигается при $\epsilon = 9,2$ %.

Установлено, что с повышением твердости прокатываемого металла интенсивность изменения его микрогеометрии с увеличением относительного обжатия снижается. Так, если для АМГ-2 максимальный коэффициент отпечатываемости $K = 0,97$ достигается при $\epsilon = 7,5$ %, то для стали 08кп — при $\epsilon = 9,2$ %, а для стали Х18Н9Т — при $\epsilon = 11$ % $K = 0,71$ (толщина листа 1,5 мм).

Результаты исследований при прокатке листов в валках с частично регулярным микрорельефом различного вида (I, II, III) показали, что при прочих равных условиях коэффициент отпечатываемости практически не зависит от вида микрорельефа. Наиболее важным параметром микрорельефа, определяющим коэффициент отпечатываемости, является относительная площадь канавки F_k . Так, максимальный коэффициент отпечатываемости $K = 0,96$ достигается при $F_k = 90$ %, $\epsilon = 6,7$ %; при $F_k = 60$ % $\epsilon = 8,6$ % и при $F_k = 30$ % $\epsilon = 10,3$ %.

Частично регулярный и регулярный микрорельефы могут быть образованы не только на листах и лентах при непрерывной про-

катке, но и на поверхностях единичных заготовок различной формы, например на медных ламелях. Особо тщательно должен экспериментально отрабатываться режим и условия прокатки регулярного микрорельефа (вид IV); неполная отпечатываемость микрорельефа прокатного валка приводит к существенному искажению заданного микрорельефа ленты или детали, а чрезмерное превышение степени обжатия — к передеформациям металла и снижению его прочностных характеристик.

Так же, как и при образовании регулярных микрорельефов с элементами вогнутой формы, при экспериментальном выявлении оптимальных значений параметров микрорельефа с элементами выпуклой формы определяется режим и условия его образования, которые фиксируются и вносятся в технологическую документацию. Таким образом, одновременно с выявлением данных для нормирования конструктором определяются необходимые данные для технологического обеспечения образования регулярных микрорельефов.

Расчет технологического обеспечения образования регулярного микрорельефа с элементами вогнутой формы. Основные параметры и характеристики, определяющие регулярный микрорельеф (тип элемента, направления его расположения, число элементов на единицу поверхности, высота неровностей) рассчитываются в следующей последовательности.

1. На основе результатов экспериментальных исследований или выбранному по прототипу конструктором для четырех- или шестиугольного типа микрорельефа в зависимости от угла расположения неровностей γ выбирается целое значение индекса n по формуле для микрорельефа четырехугольного типа

$$n = \text{tg } \gamma; \quad (105)$$

для шестиугольного типа

$$n = \frac{\sqrt{3} \text{tg } \gamma - 1}{2}. \quad (106)$$

2. Из формул (104) — для четырехугольного типа и (105) — для шестиугольного вычисляется значение дробной части $\{i\}$.

3. На основе результатов экспериментальных исследований или выбранному по прототипу в зависимости от условий эксплуатации конструктором назначается число элементов регулярного микрорельефа N , приходящихся на единицу поверхности, и, исходя из заданной величины N , вычисляется подача деформирующего элемента по формулам:

для четырехугольного микрорельефа

$$s = \sqrt{\frac{1}{N(n^2 + 1)}}; \quad (107)$$

для шестиугольного микрорельефа

$$s = \sqrt{\frac{V\sqrt{3}}{2(n^2 + n + 1)}}. \quad (108)$$

4. Из выражения (28) для определения числа элементов N определяется значение отношения i — числа двойных ходов осциллирующего деформирующего элемента к частоте вращения заготовки

$$i = N\pi ds. \quad (109)$$

5. Радиус r сферического участка деформирующего элемента определяется опытным путем, исходя из жесткости обрабатываемой заготовки. Когда этого ограничения нет, без учета упругого последействия радиус r может быть рассчитан по следующим формулам:

$$R = r - \sqrt{r^2 - (s/2)^2}; \quad r = s^2/8R. \quad (110)$$

7. Усилие вдавливания P деформирующего элемента при известном значении его радиуса r определяется, как было описано ранее, опытным путем или по эмпирическим формулам, если для обрабатываемого материала известны значения коэффициентов, определяющих его упруго-пластические свойства.

Технологическое обеспечение образования регулярного микрорельефа по прототипу. Метод технологического обеспечения аналогично нормированию по прототипу допустим лишь при условии практически полной идентичности конструкции, материала, условий эксплуатации и требований конструктора к микрогеометрии детали, принятой за прототип, и детали, для обработки которой проектируется технологический процесс. Если это условие не выполнено, необходима корректировка технологического процесса на основе данных экспериментальных исследований. Данные о технологическом обеспечении образования частично регулярного и регулярного микрорельефов могут служить как исходные при проектировании технологического процесса финишной обработки многих деталей машин и приборов. Такие же данные в большом числе содержатся в материалах гл. III.

Технологическое обеспечение образования регулярного микрорельефа на основе результатов экспериментальных исследований. Это наиболее надежный и точный, однако достаточно трудоемкий метод технологического обеспечения. Выполнение таких исследований неизбежно в случае, когда нормирование микрогеометрии выполнено конструктором на основе теоретических расчетов, без экспериментального исследования, а прототип отсутствует. Методики выполнения подобного рода исследований и их результаты в большом числе приведены в работе [15] и на рис. 73 и в гл. III. Эти данные в отдельных случаях могут служить как непосредственно при проектировании технологических процессов образования поверхностей с регулярным микрорельефом, так и исходные при планировании и выполнении экспериментальных исследований.