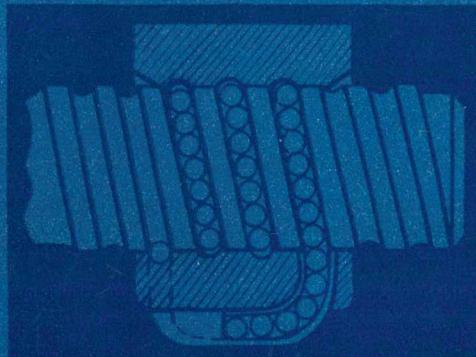


Ю. П. Русавский, Н. В. Соболева, М. Б. Шкапенюк

2 85-17
543-X

ТЕХНОЛОГИЯ ПРОИЗВОДСТВА ШАРИКОВЫХ ПЕРЕДАЧ ВИНТ-ГАЙКА КАЧЕНИЯ



• МАШИНОСТРОЕНИЕ •

Ю. П. РУСАВСКИЙ, Н. В. СОБОЛЕВА, М. Б. ШКАПЕНЮК

2 85-17
513-X

ТЕХНОЛОГИЯ ПРОИЗВОДСТВА
ШАРИКОВЫХ ПЕРЕДАЧ
ВИНТ—ГАЙКА КАЧЕНИЯ



МОСКВА «МАШИНОСТРОЕНИЕ» 1985

ББК 34.63

Р 88

УДК 621.9.06-231.223.002.2

ВВЕДЕНИЕ

Рецензент Ю. Е. Розенфельд



2007102989



Русавский Ю. П. и др.

Р 88 Технология производства шариковых передач винт — гайка качения/Ю. П. Русавский, Н. В. Соболева, М. Б. Шкапенюк. — М.: Машиностроение, 1985. — 128 с., ил.

45 к.

Изложена технология изготовления, обеспечивающая требуемую точность и надежность узла. Даны рекомендации по выбору материала, термической и механической обработке, контролю и испытанию передач, автоматизации технологического процесса.

Для инженеров-технологов машиностроительных заводов.

2704040000-606
Р 038(01)-85

Свод. пл. подписных изд. 1985 г.

ББК 34.63
6П4.6

© Издательство «Машиностроение», 1985 г.

Согласно Основным направлениям экономического и социального развития СССР на 1981—1985 годы и на период до 1990 г. одной из главных задач станкостроения является повышение производительности металлорежущих станков в 1,3—1,6 раза, увеличение их надежности и долговечности в эксплуатации, повышение точности не менее чем на 20—30 %, значительное увеличение выпуска станков с ЧПУ. Производство таких станков требует использования в них исполнительных механизмов, преобразующих вращательное движение в поступательное (и наоборот) с высокой точностью и равномерностью.

В связи с этим в последнее время широкое применение в станкостроении получили передачи винт — гайка качения (ВГК). Их основные преимущества по сравнению с передачами скольжения — высокая плавность перемещения, отсутствие зазоров в подвижном соединении, высокий КПД (порядка 95 %) и др. Эти преимущества явились причиной широкого использования передач в автомобилестроении и других отраслях машиностроения.

Передача ВГК в основном предназначается для перемещения рабочего органа станка и одновременно является отсчетной системой в станках с ЧПУ. Поэтому к ней предъявляются высокие требования как по точности, так и по жесткости и нагружочной способности.

Технический уровень передачи зависит от физико-механических свойств материала, из которого выполнены ее детали, и качества их изготовления. Требуемые физико-механические свойства резьбовых поверхностей, работающих в условиях высоких контактных нагрузок и повышенных требований к точности перемещения, обеспечиваются в результате выбора определенных сталей, назначения соответствующих методов и режимов механической и термической обработки.

В процессе механической обработки интенсивные тепловые процессы приводят к возникновению поверхностных дефектов, снижающих нагружочную способность и долговечность передачи в несколько раз. В силу этого методы и режимы механической обработки следует выбирать с учетом ограничения теплонапряженности процесса.

При малом осевом сечении ходовые винты имеют обычно боль-

шую длину. Это обуславливает радиальную и осевую деформации при их изготовлении и эксплуатации и требует проведения дополнительных технологических мероприятий.

Кинематическая погрешность передачи ВГК в основном определяется погрешностью шага резьбы ходового винта. В связи с этим формообразование резьбы винта производят с учетом влияния технологических факторов на величину погрешности шага.

Для плавности перемещения рабочего органа устройство возврата шариков и сопряжение его с резьбой гайки должны выполняться с большой точностью, что затруднительно при высокой производительности обработки и требует наличия специального оборудования, приспособлений, оснастки, технологических приспособлений.

Книга отражает опыт производства ВГК Одесским заводом прецизионных станков им. XXV съезда КПСС (ОЗПС) — крупнейшим предприятием СССР по выпуску передач классов точности Н, П и В, а также опыт других предприятий отрасли. В ней изложены опыт изготовления передач ВГК в условиях мелко- и крупносерийного производства и результаты исследований эксплуатационных характеристик этих узлов.

КОНСТРУКЦИЯ И ОСНОВНЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ ПЕРЕДАЧ ВГК

Передачи ВГК служат для преобразования вращательного движения винта (гайки) в поступательное перемещение рабочего органа механизма. В некоторых случаях передачи используют для преобразования поступательного движения во вращательное, что обусловлено отсутствием самоторможения. Благодаря ряду преимуществ, основными из которых являются высокий КПД (0,8—0,95), большая износостойкость, высокая равномерность перемещения, возможность полного устранения зазора и создания натяга, обеспечивающего необходимую осевую жесткость, передачи ВГК нашли широкое применение. Их используют в станкостроении, автомобилестроении и космической технике.

В книге рассматриваются передачи ВГК, применяемые в станкостроении. Эффективность их использования в металорежущих станках зависит в большей степени от правильного выбора конструкции и типоразмера для конкретных условий эксплуатации. Классификация передач по основным признакам показана на рис. 1.

Конструкция передач. Передача ВГК содержит винт 1, гайку 2 (чаще две гайки), корпус 5, тела качения 3 (шарики или ролики) и специальный вкладыш 4 (устройство для их возврата) (рис. 2). При вращении винта 1 (гайки) тела качения 3, находясь под действием приложенной силы, совершают сложное движение, вращаясь вокруг своих осей и оси винта (гайки). При этом рабочий орган станка, соединенный с корпусом (винтом) 5, осуществляет поступательное перемещение. Устройство 4 для возврата тел качения обеспечивает их непрерывную циркуляцию в пределах замкнутого пространства, ограниченного гайкой.

Передачи с использованием роликов в качестве тел качения имеют по сравнению с шариковыми передачами качения более низкий КПД, и, несмотря на их высокую статическую грузоподъемность, применение в машиностроении (в частности в станкостроении) таких передач ограничено.

Рассмотрим передачи, в которых телами качения являются шарики. По конструктивному исполнению эти передачи различаются профилем резьбы винта (гаек), устройствами для возврата шариков и для регулирования предварительного натяга.

Передачи ВГК имеют различные профили резьбы винта и гаек

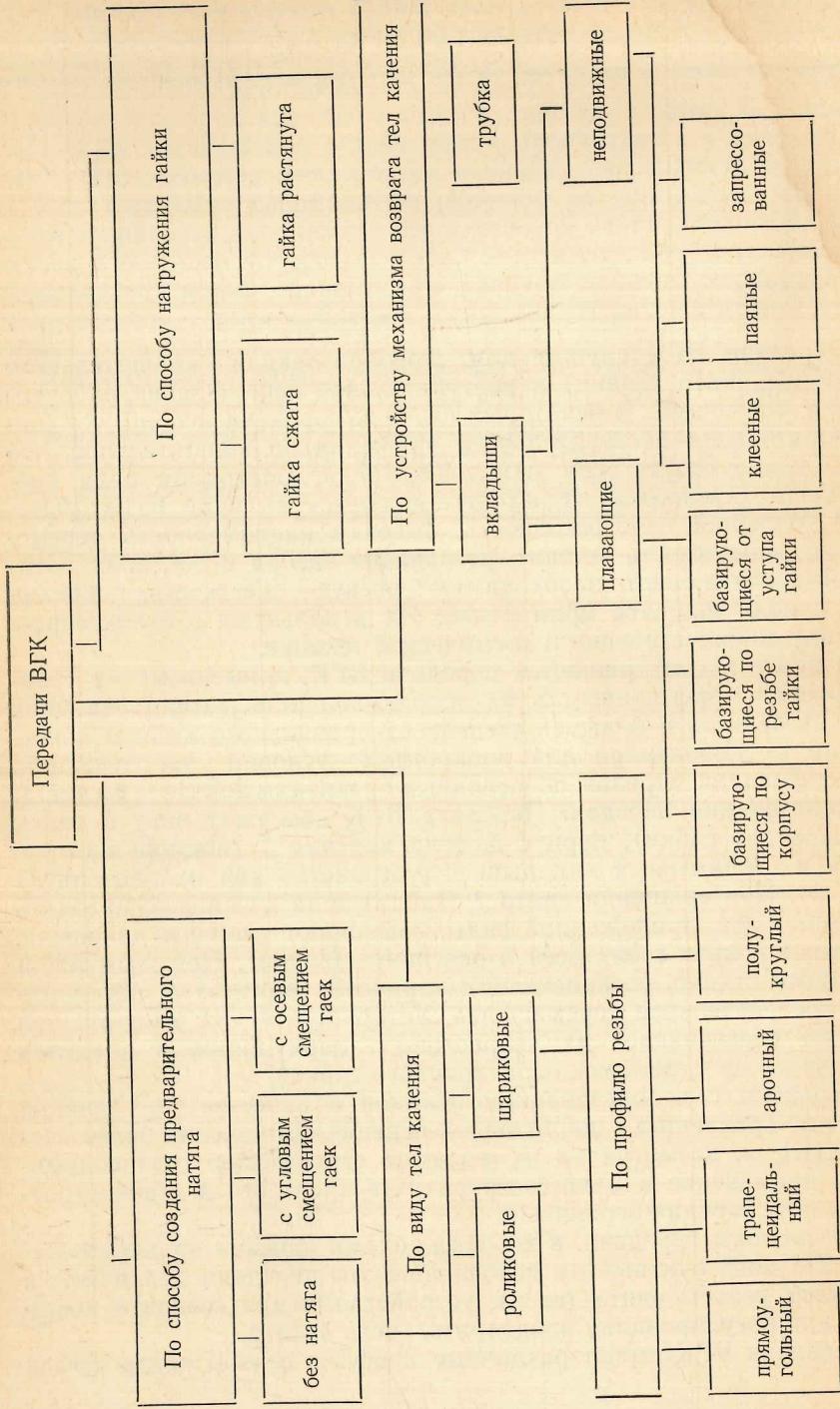


Рис. 1. Классификация передач ВГК

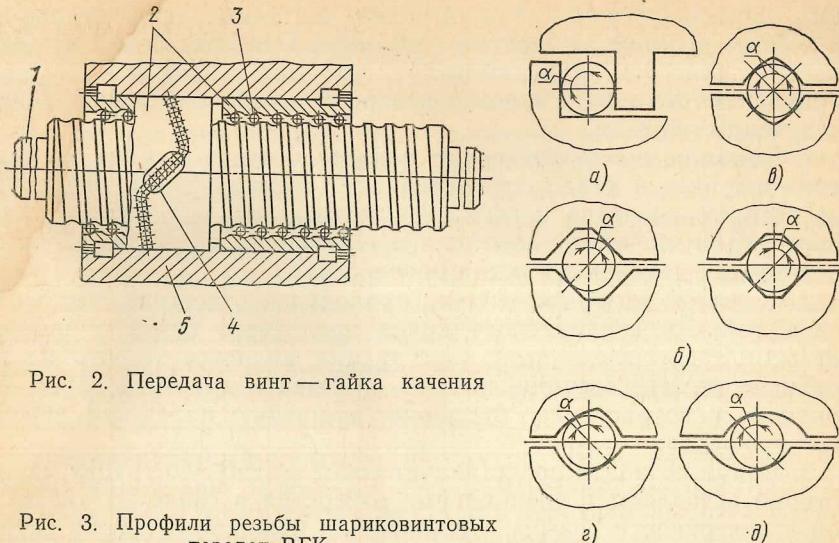


Рис. 2. Передача винт — гайка качения

Рис. 3. Профили резьбы шариковитовых передач ВГК

(рис. 3). Профили прямоугольный (рис. 3, а) и трапецидальный (рис. 3, б) просты в изготовлении, но из-за высоких контактных напряжений на беговых дорожках передачи с этими профилями имеют ограниченную статическую грузоподъемность и поэтому редко применяются в станкостроении. Профиль резьбы в виде стрельчатой арки позволяет уменьшить осевой зазор передачи и упростить геометрию канала возврата шариков (рис. 3, в). Контакт шариков с винтом и гайкой здесь осуществляется в четырех точках. Такие передачи содержат одну гайку, а их предварительный натяг осуществляется путем подбора диаметра шариков. Недостатком таких передач является то, что для компенсации изнашивания необходимо заменять шарики на шарики большего диаметра. Это требует большого числа комплектов шариков, отличающихся по диаметру на 1 мкм.

В последнее время применяют передачи с двухконтактным профилем резьбы винта и гайки в виде стрельчатой арки (рис. 3, г), где предварительный натяг осуществляется в результате сближения двух гаек.

Наиболее распространенным профилем резьбы винта и гайки является полукруглый профиль с углом контакта $\alpha=45^\circ$ (рис. 3, д). Такой профиль позволяет изготавливать винты и гайки с меньшей глубиной резьбы, что повышает технологичность конструкции. Поэтому в дальнейшем будем рассматривать конструкции и технологию изготовления именно таких передач.

Важным элементом передачи является устройство для возврата шариков, в большой степени влияющее на плавность и надежность передачи. В передачах, предназначенных для небольшого перемещения рабочего органа станка, нет необходимости в воз-

врате шариков: в них гайки удлиняют настолько, чтобы в процессе работы шарики из гаек не выходили. Известно большое число конструктивных исполнений устройств для возврата шариков. В зависимости от вида каналы возврата можно классифицировать следующим образом.

1. Канал возврата фрезеруют непосредственно в гайке. Направление шариков в канал осуществляется специальными отсекателями, которые крепятся к гайке. Существенным недостатком такой конструкции является сложность изготовления отсекателя, его недостаточная надежность и долговечность.

2. Каналом возврата служит продольное отверстие, выполненное в гайке и соединяющее конец последнего витка с началом первого. Недостатком этой конструкции является то, что на небольшом участке шарики должны описывать крутой поворот, что приводит к возрастанию трения и ухудшению плавности перемещения передачи.

3. Канал возврата представляет собой изогнутую трубку, концы которой вставлены в специальные отверстия в гайке по касательной к поверхности резьбы. Направление шариков в трубку осуществляется специальными отражателями. В этой конструкции увеличены радиальные размеры гаек. Надежность и долговечность отражателей низка.

4. Канал возврата, соединяющий два смежных витка резьбы гайки, выполнен в специальном вкладыше 4, который устанавливают в окно гайки (см.рис. 2). Эту конструкцию применяют наиболее часто. Вкладышем шарики направляются из впадины одного витка винта через выступ во впадину соседнего витка. В зависимости от числа рабочих витков гайки (чаще всего их три) шарики разделены вкладышами на такое же число независимо циркулирующих групп. Преимуществами конструкции передачи ВГК с вкладышами по сравнению с другими известными конструкциями являются малые радиальные размеры гаек, отсутствие ненадежных и быстроизнашивающихся деталей, минимальная длина канала возврата шариков. Существует ряд конструктивных исполнений вкладышей и методик расчета координат канала возврата в них. В одних конструкциях стальные вкладыши, точно пригнанные по резьбе гайки, запаяны, в других — запрессованы. Запрессованные вкладыши, в отличие от запаянных, деформируют резьбу, изменяют внутришаговую и накопленную погрешность шага, приводят к вспучиванию упорного торца гайки. Недостатком запаянных вкладышей является высокая трудоемкость и нетехнологичность сборки.

В последнее время получили распространение «плавающие» вкладыши, мало перемещающиеся в окне гайки. Для того, чтобы они не выпадали в процессе эксплуатации, их удерживают корпусом, в который устанавливают гайки.

ОЗПС совместно с Одесским СКБ прецизионных станков разработал конструкцию, в которой плавающие вкладыши вкладываются в окна изнутри гаек и базируются по резьбе с помощью двух

усиков, расположенных на нерабочих участках резьбы гаек. Такая конструкция позволяет изготавливать вкладыши на пресс-автоматах, полностью исключает ручную подгонку при сборке и наиболее приемлема в крупносерийном и массовом производстве передач.

Расчет координат траектории движения центра шарика в канале возврата производят исходя из требований плавности входа шарика в канал и свободного выхода из него, а также свободного (без натяга и заклинивания) перемещения шарика внутри канала возврата. Аналитические методы расчета канала возврата шариков во вкладыше рассмотрены в работах [8, 12, 14], причем, в работах [8, 12] приведен расчет для удлиненного вкладыша, наклоненного к резьбе гайки под углом 45° , а в работе [14] — аналитический метод расчета координат вкладыша, имеющего цилиндрическую форму. Последняя конструкция выгодно отличается от предыдущих высокой технологичностью.

Предварительный натяг в передачах ВГК осуществляют с целью устранения зазора за счет деформации контактирующих тел. Благодаря этому натягу жесткость передачи возрастает и становится практически постоянной величиной, не зависящей от приложенной в дальнейшем осевой нагрузки.

Устранение зазоров и создание предварительного натяга в передачах с полукруглым профилем резьбы осуществляют путем изменения взаимного расположения гаек двумя основными способами: изменением положения гаек в осевом направлении при неизменном угловом их взаиморасположении и изменением углового положения гаек.

При первом способе натяг регулируют с помощью мерных шлифованных прокладок (компенсаторов) или пружиной, заключенной между гайками. Недостатками этого способа являются необходимость пригонки компенсаторов при сборке и низкая жесткость передачи, снабженной пружиной.

Не имеют указанных недостатков передачи, где предварительный натяг создается путем упругого деформирования контактирующих рабочих тел (шариков, винта, гаек, корпуса) регулированием расположения гаек в угловом направлении. Для этого в наиболее распространенной конструкции (см. рис. 2) гайки снабжены зубчатыми венцами, входящими в зацепление с зубчатыми венцами корпуса. Число зубьев одной гайки отличается от числа зубьев другой гайки на единицу. Таким образом, применяют дифференциальный зубчатый механизм, проворачивающий гайки друг относительно друга на малый угол.

При шаге резьбы P , числе зубьев одной из гаек z и второй $z+1$ поворот обеих гаек в одну сторону на k зубьев приводит к их осевому сближению (удалению) на величину Δ_h :

$$\Delta_h = \frac{Pk}{z(z+1)}. \quad (1)$$

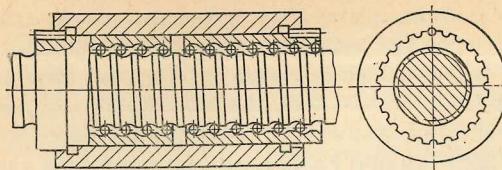


Рис. 4. Передача ВГК, обеспечивающая регулирование предварительного натяга без демонтажа передачи

Возникающая при этом сила натяга воспринимается внутренним буртом корпуса либо его торцами.

Недостаток рассмотренной конструкции — невозможность регулирования натяга без демонтажа передачи. На рис. 4 показана конструкция передачи, лишенная указанного недостатка [А. с. 524944 (СССР)]. На фланцах гаек в передаче вместо зубьев выполнены секторы, число которых в одной и другой гайках отличается на единицу, а на каждом торце корпуса выполнено отверстие. В процессе сборки передачи один из секторов каждой из гаек совмещают с отверстием в соответствующем торце корпуса и вставляют штифты, предохраняющие гайки от проворота. Натяг регулируют непосредственно на винте без свинчивания гаек на шейку винта. Для этого вынимают штифты, обе гайки проворачивают на необходимое число секторов и вновь штифтируют. При этом осевое сближение гаек вычисляется по формуле (1), где z — число секторов на одной гайке, а $z+1$ — число секторов на другой. Недостатком данной конструкции является то, что гайка работает «на отрыв фланца», что иногда (при недостаточной толщине фланца и высокой концентрации напряжений) приводит к разрушению гайки.

Известны также конструкции передач, где гайки упираются торцами друг в друга или в промежуточное кольцо. Предварительный натяг в них регулируют непосредственно на винте свинчиванием гаек навстречу друг другу. Недостатком этих конструкций является невозможность дозированного регулирования натяга.

В зависимости от требований к нагружочной способности, жесткости, долговечности передачи ВГК и присоединительным размерам рекомендуют следующее.

1. В станках, где в передачах допустимо наличие зазора (например, при перемещении вертикально движущихся тяжелых узлов), применять передачу ВГК с одной гайкой и полукруглым профилем резьбы, который прост в изготовлении.

2. В станках, где необходима высокая жесткость и допускается высокий момент холостого хода, применяют передачу, описанную на с. 8 п. 2. Такая конструкция позволит целиком использовать резьбу гаек, что приведет к увеличению числа рабочих шариков и, следовательно, нагружочной способности и жесткости передачи ВГК. При единичном производстве предварительный натяг в такой передаче создают с помощью мерных шлифованных прокладок (компенсаторов), изготовление которых не требует специального оборудования. В серийном производстве целесообразно изготавливать конструкцию передач, у которых натяг осуществляется с помощью дифференциального зубчатого механизма.

3. В станках, где передачи работают под небольшой нагрузкой, но недопустимо наличие зазора (например, в приводах координатно-расточных и координатно-шлифовальных станков), применять передачи с профилем резьбы в виде стрельчатой арки с одной гайкой. Предварительный натяг осуществляют путем подбора диаметра шариков, контакт которых с гайкой и витком резьбы осуществляется в четырех точках (см. рис. 3, в). Ввиду небольшой нагрузки на передачу ее изнашивание невелико, и отсутствует необходимость в частой замене шариков.

4. В крупносерийном и массовом производстве передач ВГК, к которым предъявляются высокие требования по жесткости, плавности перемещения и долговечности, применять передачи с полу круглым профилем резьбы с двумя гайками (см. рис. 3, д) или передачи с двухконтактным профилем резьбы в виде стрельчатой арки (см. рис. 3, г). Предварительный натяг целесообразно осуществлять с помощью дифференциального зубчатого механизма. Ввиду высоких требований к плавности перемещения рабочего органа станка канал возврата шариков целесообразно выполнять во вкладыше (см. рис. 2).

Основные эксплуатационные характеристики. Каждая передача ВГК характеризуется базовой статической грузоподъемностью. Базовая статическая грузоподъемность — осевая статическая нагрузка, вызывающая общую остаточную деформацию, не превышающую 10^{-4} диаметра шарика в наиболее нагруженной точке контакта шариков с дорожкой качения при твердости рабочих поверхностей винта и гаек HRC_9 , 61.

Базовая статическая грузоподъемность передачи ВГК

$$C_0 = 49z_p d_{\text{ш}}^2 \sin \alpha \cos \lambda,$$

где z_p — расчетное число шариков одной гайки, одновременно находящихся в работе, равно разности между общим числом шариков, находящихся в гайке, и числом шариков, находящихся в канале возврата; $d_{\text{ш}}$ — диаметр шарика, мм; α — угол контакта (см. рис. 3); λ — угол подъема винтовой линии.

Для контактирующих поверхностей винта и гаек с твердостью, отличной от HRC_9 , 61, статическая грузоподъемность C'_0 вычисляется по формуле

$$C'_0 = C_0 (HRC_9/61)^3,$$

где HRC_9 — наименьшая твердость контактирующих поверхностей по Роквеллу.

В табл. 1 приведены расчетные значения базовой статической грузоподъемности передач, применяемых в станкостроении.

Погрешности изготовления винтовых поверхностей винта и гаек, а также отклонения от перпендикулярности рабочих торцов гаек к оси резьбы и отклонения от параллельности упорных буртов корпуса приводят к неравномерному распределению нагрузки

1. Базовая статическая грузоподъемность передач ВГК

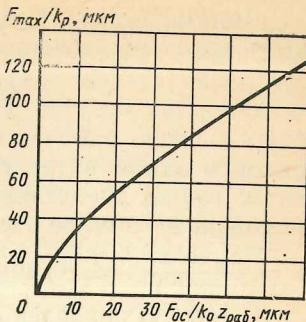
Шаг резьбы P , мм	Номинальный диаметр d_0 , мм	Диаметр шариков $d_{\text{ш}}$, мм	Число рабочих шариков в гайке z_p	Базовая статическая грузоподъемность C_0 , кН
5	20	3	48	15,0
	25		63	20,0
	32		84	26,7
	40		111	35,3
	50		141	44,9
6	32	3,5	69	29,9
	40		93	40,3
	50		117	50,7
10	40	6	48	61,1
	50		63	80,2
	63		84	107
	80		111	141
	100		141	179
12	50	7	51	88,4
20	80	10	60	212
	100		78	276

2. Значения статических грузоподъемностей передач (HRC_3 59; $A_0=8$ мкм)

P , мм	d_0 , мм	K_0 , $\text{Н}/\text{мм}^{3/2}$	$K_0 z_p$, $\text{Н}/\text{мм}^{3/2}$	C'_0 , кН
5	20	2,40	115,2	9,04
	25		151,2	12,1
	32		201,6	16,1
	40		266,4	21,4
	50		338,4	27,2
6	32	2,61	180,1	18,2
	40		242,7	24,5
	50		305,4	30,8
10	40	3,27	157,0	37,5
	50		206,0	49,2
	63		274,7	65,7
	80		363,0	86,5
	100		461,1	110
12	50	3,52	179,5	54,3
20	80	4,31	258,6	131
	100		336,2	270

между шариками и уменьшают статическую грузоподъемность передачи C'_0 . Погрешности резьбы винта и гайки обусловлены кинематической погрешностью резьбошлифовального станка, жесткостью системы СПИД и носят периодический характер, имеющий вид синусоиды, период которой равен шагу резьбы передачи. Отклонения от перпендикулярности торца гайки к оси резьбы и отклонения от параллельности упорных буртов корпуса вносят дополнительно погрешность, изменяющуюся по синусоидальному закону, с периодом, равным шагу резьбы. Эта погрешность приводит к распределению деформации шариков по синусоидальному закону с периодом, равным шагу резьбы. Как показал анализ допусков передач класса Н и П, применяемых в станкостроении [5], наиболее вероятное значение амплитуды деформации шариков $A_0=8$ мкм.

Рис. 5. Зависимость силы, действующей на наиболее нагруженный шарик, от осевой силы при наличии погрешности резьбы



Пусть на i -й шарик действует сила F_i в точке контакта с винтом. Тогда, исходя из формулы Герца, суммарная осевая деформация δ_i стыка винт — шарик — гайка

$$F_i = K_0 \delta_i^{3/2},$$

где K_0 — коэффициент, зависящий от геометрических параметров передачи. Значения коэффициента K_0 для передач, применяемых в станкостроении, приведены в табл. 2.

Зависимость осевой силы F_{\max} , действующей на наиболее нагруженный шарик, от величины, действующей на передачу осевой силы F_{oc} , показана на рис. 5. Эта зависимость соответствует наиболее вероятной амплитуде деформаций шариков $A_0=8$ мкм. Сила F_{oc} является суммой осевой силы предварительного натяга и внешней осевой нагрузки. В табл. 2 приведены значения произведения $K_0 z_p$ и статической грузоподъемности C'_0 передач, изготовленных с наиболее вероятной погрешностью при твердости контактирующих поверхностей HRC_3 59. Важной характеристикой передачи является ее долговечность, определяемая началом разрушения контактирующих тел.

Долговечность — расчетный срок службы передачи, в течение которого не менее 90 % одной и той же партии передач должны проработать до появления первых признаков усталости материала.

Срок службы, в течение которого не менее 50 % передач одной и той же партии могут проработать до появления первых признаков усталости материала, примерно в 5 раз больше расчетной долговечности.

В условиях эксплуатации на передачу действуют различные по величине и направлению силы, что приводит к различным условиям работы каждой из гаек. Первые признаки усталости появляются на шариках наиболее нагруженной гайки. Из-за этого долговечность передачи рассчитываем исходя из сил, действующих на наиболее нагруженную гайку.

Долговечность передачи (при твердости рабочих поверхностей винта и гаек HRC_3 59), на которую действует постоянная по величине и направлению осевая сила, вычисляется по формуле [13]

$$L = (C/F_{\text{oc}})^3 10^6, \quad (2)$$

где L — долговечность, число оборотов винта (гайки); C — динамическая грузоподъемность, численно равная осевой силе, при действии которой на передачу долговечность составляет 10^6 оборотов, Н; F_{oc} — осевая сила, действующая на передачу, Н.

Динамическая грузоподъемность передач ВГК, угол контакта которых $\alpha = 45^\circ$, вычисляется по формуле [13]

$$C = 7,8 f_c i^{0,7} d_{\text{ш}}^{1,8} (z' z)^{1/3}, \quad (3)$$

где i — число рабочих витков в одной гайке; z' — общее число шариков в одном витке гайки; z — число рабочих шариков в одном витке гайки, представляющее собой разность между z' и числом шариков в канале возврата; f_c — коэффициент, зависящий от $\omega = \frac{d_{\text{ш}} \cos \alpha}{d_0}$ (d_0 — номинальный диаметр, мм).

В табл. 3 приведены значения коэффициента f_c и динамической грузоподъемности C передач ВГК, применяемых в станкостроении.

3. Динамическая грузоподъемность передач

P , мм	d_0 , мм	ω	f_c	C , кН	P , мм	d_0 , мм	ω	f_c	C , кН
5	20	0,1061	10,2	8,7	10	40	0,1061	10,2	30,2
	25	0,0849	9,8	9,8		50	0,0849	9,8	34,0
	32	0,0663	9,2	11,0		63	0,0673	9,3	38,5
	40	0,0530	8,7	12,3		80	0,0530	8,7	42,9
	50	0,0424	8,2	13,5		100	0,0424	8,2	47,0
6	32	0,0773	9,6	13,4	12	50	0,0990	10,1	40,9
	40	0,0619	9,1	15,2		80	0,0884	9,9	83,9
	50	0,0495	8,6	16,6	20	100	0,0707	9,4	93,4

На рис. 6 в логарифмической системе координат построена номограмма зависимости долговечности передач ВГК от действующей осевой нагрузки F_{oc} .

Для передач, твердость контактирующих поверхностей которых отлична от HRC_9 59, динамическая грузоподъемность

$$C' = (HRC_9/59)^{3,6} C.$$

Формула (2) справедлива при условии, что на передачу действует постоянная по величине и направлению сила. В реальных условиях эксплуатации на передачу действуют различные по величине и направлению силы. Для определения долговечности передачи ВГК в этом случае вводится эквивалентная осевая нагрузка.

Эквивалентная осевая нагрузка — такая постоянная по величине и направлению осевая сила, которая, действуя на передачу ВГК, обеспечит такую же долговечность, как и реально действующие осевые нагрузки.

Определим эквивалентную осевую нагрузку на гайку в передаче, собранной с осевой силой предварительного натяга $F_{\text{н}}$.

Как известно, часть осевой силы, действующей на передачу ВГК, собранную с предварительным натягом, идет на нагружение одной гайки, а часть разгружает другую.

Пусть на передачу со стороны первой гайки действуют осевые силы F_{i1} ($i=1, 2, 3, \dots, k$), а со стороны второй гайки осевые силы F_{j2} ($j=1, 2, 3, \dots, s$). Время действия сил F_{i1} в процентах к общему времени t_{i1} , а соответствующее им число оборотов винта (гайки) — n_{i1} . Продолжительность действия сил F_{j2} — в процентах к общему времени t_{j2} , а соответствующее им число оборотов винта — n_{j2} . Силы, действующие при этом на первую гайку передачи, обозначим F'_{i1} и F'_{j2} , а на вторую — соответственно F''_{i1} и F''_{j2} .

Силу F'_{i1} для передач, имеющих наиболее вероятную погрешность изготовления, определяют по формуле

$$F'_{i1} = F_{\text{н}} \left(1 + \frac{F_{i1}}{4F_{\text{н}}} \right)^2.$$

Силу F''_{i1} действующую при этом на вторую гайку, определяют по формуле

$$F''_{i1} = F'_{i1} - F_{i1}.$$

Аналогично, заменяя индексацию, определяем осевые силы F'_{j2} и F''_{j2} , действующие на вторую и первую гайки, если к передаче приложены осевые силы F_{j2} .

Эквивалентная нагрузка на первую гайку передачи [13]

$$F'_{\text{экв}} = \left(\sum_{i=1}^k (F'_{i1})^3 n_{i1} t_{i1} + \sum_{j=1}^s (F'_{j2})^3 n_{j2} t_{j2} \right)^{1/3} / 100n_{\text{ср}},$$

где $n_{\text{ср}}$ — среднее число оборотов передачи при постоянной нагрузке и переменной скорости вращения винта (гайки);

$$n_{\text{ср}} = 0,01 \left(\sum_{i=1}^k n_{i1} t_{i1} + \sum_{j=1}^s n_{j2} t_{j2} \right).$$

Аналогично находим эквивалентную осевую силу $F''_{\text{экв}}$ действующую на вторую гайку. Из полученных значений $F'_{\text{экв}}$ и $F''_{\text{экв}}$ выбираем максимальную F_{oc} , по которой определяем долговечность передачи ВГК, используя формулу (2) либо номограмму (рис. 6).

Как показал расчет, конусность винта и гаек, погрешность шага и накопленная погрешность шага резьбы винта и гаек, отклонение от параллельности упорных буртов корпуса и отклонения от перпендикулярности рабочих торцов гаек к оси резьбы при наиболее вероятных величинах погрешностей изготовления деталей передач ВГК увеличивают эквивалентную осевую нагрузку в 2 раза. Исходя из формулы (2), долговечность передачи, обратно

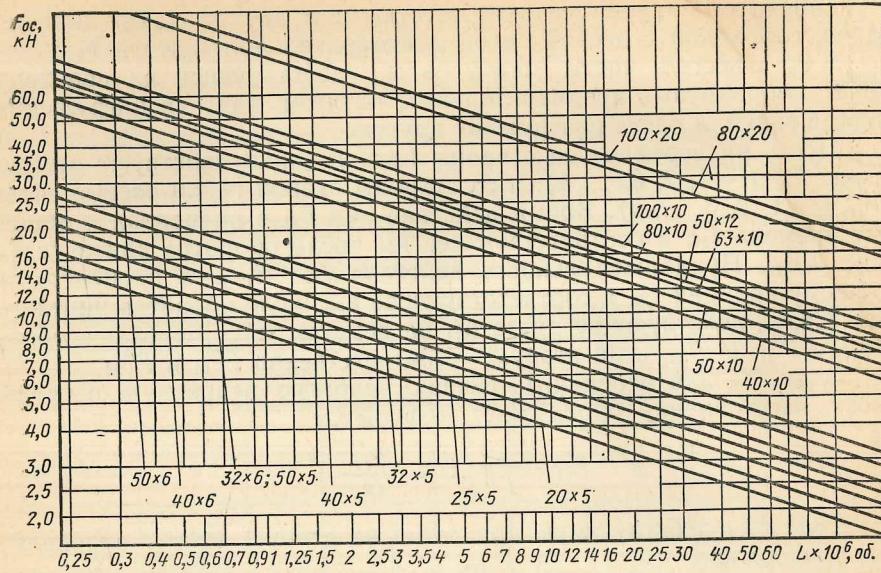


Рис. 6. Номограмма зависимости долговечности передачи ВГК от величины осевой нагрузки

пропорциональна кубу величины нагрузки, уменьшается при этом в 8 раз.

Важной характеристикой передачи является осевая жесткость γ , под которой понимают отношение действующей на передачу осевой силы к осевому смещению корпуса передачи относительно винта при условии, что винт не должен проворачиваться относительно корпуса. Вместо жесткости передачи часто рассматривают осевую податливость e — величину, обратную жесткости. Как показывают расчет и данные эксперимента, податливость (жесткость) передачи, собранной с предварительным натягом, с высокой степенью точности является величиной постоянной и не зависит от действующей осевой нагрузки (зависит только от силы предварительного натяга F_h см. приложение 2).

Общая осевая податливость e передачи ВГК (за исключением податливости тела винта) представляет собой сумму податливостей стыков винт — шарики — гайка и гайка — корпус:

$$e = e_1 + e_2,$$

где e_1 , e_2 — осевые податливости стыков винт — шарики — гайка и гайка — корпус, мкм/Н.

Исходя из формул Герца для зависимости деформации стыка двух тел от действующей силы получим, что

$$e_1 = (3(K_0 z_p)^{2/3} F_h)^{-1},$$

где значения $K_0 z_p$ даны в табл. 2.

Исследования, проведенные Одесским СКБ ПС, показали, что зависимость деформации стыка гайка — корпус от величины осевой силы выражается формулой [5]

$$F_{oc} = S_{ct}(A\delta^2 + B\delta),$$

где S_{ct} — площадь стыка, м²; A — коэффициент, Н/(м² · мкм²); δ — деформация стыка, мкм; B — коэффициент, Н/(м² · мкм).

Коэффициенты A и B зависят от параметров шероховатости соприкасающихся поверхностей. Для случая, когда рабочий торец гайки шлифованный ($R_a=0,63$ мкм), а упорный бурт корпуса точеный ($R_z=20$ мкм).

$$A = 1,3 \cdot 10^6 H/(m^2 \cdot \text{мкм}^2); \quad B = 10^6 H/(m^2 \cdot \text{мкм}).$$

Для случая, когда рабочий торец гайки и упорный бурт корпуса шлифованы ($R_a=0,63$ мкм): $A=5,5 \cdot 10^6 H/(m^2 \cdot \text{мкм}^2)$; $B=4,6 \times 10^6 H/(m^2 \cdot \text{мкм})$. Податливость стыка гайка — корпус [5]

$$e_2 = [2S_{ct}(2A\delta_{h.c} + B)]^{-1},$$

где $\delta_{h.c}$ — осевой предварительный натяг стыка, мкм, вызванный осевой силой натяга F_h , Н.

Предварительный натяг $\delta_{h.c}$ находим как положительный корень уравнения

$$A\delta_{h.c}^2 + B\delta_{h.c} - \frac{F_h}{S_{ct}} = 0.$$

Погрешности изготовления передачи ВГК приводят к неравномерной нагрузке на шарики и увеличивают ее податливость. Наиболее вероятная суммарная погрешность изготовления передач, применяемых в станкостроении, согласно расчетам, увеличивает податливость стыка винт — шарики — гайка в 1,2 раза, а податливость стыка гайка — корпус в 2—3 раза. Ввиду того, что податливость стыка гайка — корпус составляет лишь 4—5 % податливости стыка винт — шарики — гайка, суммарная податливость передачи ВГК увеличивается в 1,4 раза.

Наличие зазора в передачах ВГК не позволяет получить точную передачу движения от двигателя к рабочему органу и тем самым снижает точность обработки детали. Поэтому для передач, применяемых в следящих системах и механизмах привода подач станков с программным управлением, наличие осевого зазора недопустимо. Для устранения осевого зазора передача с полукруглым профилем резьбы винта и гайки содержит две гайки и механизм для создания и регулирования предварительного натяга.

Для того чтобы в процессе эксплуатации передачи не произошло «раскрытие стыка» между двумя гайками, силу осевого предварительного натяга следует выбрать (с учетом погрешностей изготовления передачи) равной 0,25—0,3 предельной осевой нагрузки, действующей на передачу. В случае повышенных требований к жесткости передачи осевую силу предварительного натяга выбирают равной (0,15—0,20) базовой статической грузо-

подъемности. При этом следует иметь в виду, что жесткость передачи пропорциональна корню кубическому силы предварительного натяга, в то время как долговечность передачи обратно пропорциональна силе предварительного натяга в кубе. Определить осевую силу предварительного натяга F_n по величине осевой деформации δ_n практически невозможно, ввиду того что δ_n при одной и той же F_n существенно зависит от погрешностей изготовления передачи.

Наиболее приемлемым методом контроля силы предварительного натяга является определение момента вспомогательного (холостого) хода передачи ВГК (см. приложение 3).

Момент вспомогательного хода передачи ВГК, собранной с предварительным натягом, согласно расчетам, проведенным в Одесском СКБ ПС, вычисляют по формуле

$$M_{x.x} = F_n \frac{d_b}{2} \frac{f_k}{r_w \sin \alpha}, \quad (4)$$

где $M_{x.x}$ — момент вспомогательного хода, Н·м; F_n — сила осевого предварительного натяга, Н; d_b — рабочий диаметр винта, м; f_k — коэффициент трения качения, м; r_w — радиус шарика, м.

В Одесском СКБ ПС экспериментально определен коэффициент трения качения. Как показал эксперимент, этот коэффициент зависит от величины приложенной осевой силы F_n и увеличивается с ее ростом. Это объясняется тем, что с увеличением F_n увеличивается пятно контакта шарика с винтом и гайкой, в результате чего возрастает проскальзывание. При силе осевого предварительного натяга, равной (0,07—0,1) базовой статической грузоподъемности (обычно такой выбирается сила предварительного натяга передач ВГК в станках с программным управлением), коэффициент трения качения $f_k = 0,55 \cdot 10^{-5}$ м. Как видно из формулы (4), момент вспомогательного хода линейно зависит от осевой силы предварительного натяга и может являться косвенной характеристикой этой силы независимо от погрешностей изготовления элементов передачи ВГК.

В процессе эксплуатации передачи ВГК происходит изнашивание шариков и резьбовых поверхностей винта и гаек. В результате их изнашивания уменьшается сила предварительного натяга, что приводит также к уменьшению жесткости и потере точности перемещения.

Поэтому периодически, по мере изнашивания частей передачи, необходимо производить ее регулирование с целью восстановления первоначальных параметров передачи.

Основными причинами, вызывающими изнашивание элементов передачи, являются:

1) проскальзывание шариков при качении их по винтовой линии из-за неодинакового расстояния точек площадки контакта от оси вращения шарика;

2) проскальзывание шариков в резьбе из-за наличия угла подъема винтовой линии;

3) трение шарика о шарик, возникающее в результате геометрических погрешностей резьбовых поверхностей винта (гаек) и разноразмерности шариков;

4) погрешности изготовления канала возврата, затрудняющие вход шариков в канал и выход из него;

5) недостаточно надежная защита передачи ВГК от попадания пыли, абразивных частиц и химически активных веществ;

6) отсутствие или недостаточное количество смазывающих материалов.

Как показали исследования, проведенные в Одесском СКБ ПС, уменьшение силы предварительного натяга происходит в основном в результате изнашивания шариков и гаек. Винт, имея длину гораздо большую, чем гайка, изнашивается значительно меньше. Так, изнашивание шариков передач, работающих на вспомогательном ходу под действием силы предварительного натяга $F_n = 0,14 C_0$, составляет за первые 10^6 оборотов винта 1 мкм на диаметр. В дальнейшем, до наступления признаков усталости износ за каждые 10^6 оборотов составляет 0,5 мкм на диаметр шарика. С наступлением первых признаков усталости изнашивание шариков вновь возрастает. По данным эксперимента, изнашивание гаек после выхода передачи из строя из-за начавшегося питтинга на шариках составляет 50—70 % от изнашивания шариков по диаметру за все время работы передачи. Столь малое изнашивание гаек объясняется увеличением угла контакта, приводящим к изменению диаметра резьбы винта и гайки.

Для восстановления исходных выходных параметров передачи ВГК (момента вспомогательного хода, осевой жесткости) необходимо осуществить регулирование, сблизив гайки относительно друг друга на величину, примерно равную $\Delta \sin \alpha$, где Δ — суммарный износ обеих гаек и шариков, выраженный в линейных единицах.

Работоспособность передачи ограничена критической частотой вращения, при которой наступает резонанс.

Критическая частота вращения, об/мин,

$$n_{kp} = \frac{d_0}{S^2} \left(\frac{Eg}{\rho} \right)^{1/2} \frac{30}{\pi} \beta v,$$

где E — модуль упругости материала винта, Н/мм² ($E = 2 \times 10^5$ Н/мм²); ρ — плотность материала винта; $\rho = 7,8 \cdot 10^{-6}$ кг/мм³; g — ускорение силы тяжести; $g = 9,8 \cdot 10^3$ мм/с²; S — неопорная длина винта, т. е. расстояние между двумя опорами, мм, β — коэффициент запаса; $\beta = 0,8$; v — коэффициент заделки винта.

Значения коэффициента v зависят от способа заделки винта. Так, при жесткой заделке обоих концов винта $v = 5,6$. Если один конец заделан жестко, а другой опорный, то $v = 3,9$; если оба конца опорные, $v = 2,5$; если один конец заделан жестко, а другой свободный, то $v = 0,9$.

Точность позиционирования рабочего органа станка определяется кинематической точностью передачи ВГК, перемещающей

этот орган. Кинематическая точность передачи зависит от точности изготовления и сборки ее элементов. Исследования показали, что кинематическая точность передачи определяется величиной накопленной погрешности шага винта, а внутришаговая погрешность передачи на порядок меньше внутришаговой погрешности винта и гайки. Это объясняется усреднением внутришаговой погрешности винта и двух гаек. Полученные экспериментальные данные позволяют сделать вывод, что после восстановления утраченного в результате изнашивания предварительного натяга кинематическая точность передачи ВГК практически не изменяется. Установлено, что с увеличением шага передачи и силы предварительного натяга кинематическая точность передачи в пределах шага повышается.

ТЕХНОЛОГИЯ ПРОИЗВОДСТВА ХОДОВЫХ ВИНТОВ КАЧЕНИЯ

Выбор материала и термическая обработка винтов. Ходовые винты качения по упрощенной схеме работают одновременно как подшипники и валы с концентрическим нагружением, т. е. они должны выдерживать высокие контактные и изгибные нагрузки и сохранять стабильность размеров. Указанные качества налагают особые требования на стали, предназначенные для изготовления винтов. Такие стали должны иметь плотную макроструктуру, минимальное содержание неметаллических включений, удовлетворительную карбидную сегрегацию, а также должны обладать технологичностью и размерной стабильностью. Химический состав сталей должен обеспечить получение высокой твердости. Исследования, проведенные в ЭНИМСе, показали, что для изготовления высокоточных винтов можно рекомендовать сталь ХВГ с объемной закалкой.

Сталь ХВГ с объемной закалкой рекомендуется при изготовлении ходовых винтов с наружным диаметром до 70 мм. Особенностью этой стали является значительное колебание прокаливаемости в зависимости от индивидуальных особенностей плавок. В связи с этим сталь ХВГ можно использовать без специальной проверки лишь для изготовления винтов диаметром до 50 мм. При большем диаметре винта сталь ХВГ подлежит обязательному предварительному контролю на прокаливаемость.

Качество исходного материала контролируют перед началом обработки по двум параметрам — микроструктуре и прокаливаемости. Для контроля микроструктуры от двух-трех прутков отрезают образцы толщиной 10—15 мм, которые затем фрезеруют на секторы, из которых изготавливают шлифы для исследования микроструктуры. Образцы отрезают с обоих концов прутка. Материал считают годным, если микроструктура состоит из зернистого перлита и мелких, равномерно распределенных карбидов. При отклонениях в структуре, в зависимости от вида обнаруженных дефектов

(участки пластинчатого перлита, крупные карбиды, следы карбидной сетки и пр.) назначают предварительную термообработку для получения оптимальной структуры. Возможность исправления структуры сначала проверяют на образцах. Если получена нормальная микроструктура, такой же термообработке подвергают все заготовки винтов. Если структура не поддается исправлению, материал бракуют.

Предварительный контроль прокаливаемости необходим из-за значительных колебаний этой характеристики в зависимости от индивидуальных особенностей различных плавок металла. Так, значительное количество заготовок диаметром более 50 мм не обеспечивает твердость HRC_9 59—63, и заготовки не могут быть использованы для изготовления ходовых винтов передач ВГК.

Согласно существующим рекомендациям прокаливаемость стали ХВГ можно повысить предварительной термообработкой заготовок, заключающейся в нормализации с последующим отпуском. Для контроля на прокаливаемость от материала данной плавки отрезают четыре заготовки длиной, равной четырем диаметрам винта. Две заготовки, предварительно обточенные в соответствии с чертежом до наружного диаметра винта, подвергают пробной закалке по режимам и условиям, полностью соответствующим закалке винтов (способ нагрева, температура, выдержка, охлаждающая среда).

Заготовки считаются годными, если полученная поверхностная твердость по длине образца в среднем сечении не ниже HRC_9 62. В случае получения твердости ниже HRC_9 62 два вторых образца подвергают предварительной термообработке, которая включает следующие операции:

а) нормализацию — нагрев в печи до $900 \pm 10^\circ\text{C}$, выдержка после прогрева в течение 35—40 мин и охлаждение на воздухе;

б) отпуск при температуре $500 \pm 10^\circ\text{C}$, выдержка в течение 2 ч.

Затем эти же образцы, подобно первым двум, подвергают закалке. Материал заготовок считается годным только в том случае, если твердость закаленных образцов, обработанных таким образом, достигает HRC_9 62 и выше.

Практически всем прутам из стали ХВГ присуща грубая карбидная ликвация и полосчатость, с которыми вести борьбу в условиях завода почти невозможно. Учитывая недостатки стали ХВГ, особенно выявляемые при изготовлении винтов диаметром более 50 мм, на заводе, в результате поисков и экспериментальных проб, в качестве материала для винтов диаметром более 50 мм была принята сталь 7ХГ2ВМ, в которой также, хотя и в меньшей мере, встречается полосчатость.

Общепринятая технология термической обработки не исключает полностью брак винтов по биению и микротрещинам. Эти дефекты выявляют на разных этапах разъбошлифования, что связано как с неоднозначным воздействием технологических процессов, так и с несовершенством нагревательных печей. По данным Московского завода координатно-расточных станков коробление вин-

тов из стали ХВГ при закалке с нагревом в шахтных печах достигает 10 мм. Кроме того, наблюдается неравномерная твердость. Для устранения этих недостатков на заготовках из стали ХВГ и 7ХГ2ВМ вместо первого стабилизирующего отпуска проводят отжиг. При этом устранение аустенитных участков стали 7ХГ2ВМ возможно при режиме: нагрев до 780 °С, выдержка после прогрева — 2 ч, охлаждение до 680 °С со скоростью 25—30 °С/ч, выдержка — 2 ч, охлаждение до 500 °С со скоростью 25 °С/ч, охлаждение на воздухе.

По наблюдениям отжиг (для стали ХВГ и нормализация с отпуском) повышает закаливаемость и уменьшает неравномерность твердости после закалки. Существенным является выбор температуры закалки и охлаждающей среды. Винты из стали ХВГ диаметром до 50 мм закаливают при температуре 830 °С, больших диаметров — при 840—850 °С.

Охлаждение производят в ванне, заполненной маслом индустриальным 20 при температуре 70—90 °С. Меньшая температура увеличивает деформацию винтов, а более высокая снижает твердость. Винты длиной свыше 1000 мм нагревают под закалку в печи типа СШЗ-6.30/10. Принято править нежесткие винты из стали ХВГ с биением до 2—3 мм. Неподдающиеся правке винты с биением 3 мм и больше подлежат отжигу и повторной закалке. Биение винтов длиной 2400 мм, диаметром 70 мм из стали 7ХГ2ВМ не превышает 1—1,5 мм. Отпуск закаленных деталей осуществляют в масляной ванне при постоянном перемешивании. Применение масла цилиндрового 52 позволяет довести температуру отпуска винтов из стали ХВГ до 250—290 °С, а винтов из стали 7ХГ2ВМ и 8ХФ — до 250—260 °С. Продолжительность отпуска 20—24 ч. Если на шлифовальных операциях биение возрастает или не устраняется, то винты отправляют на дополнительный пяти- и восьмичасовой отпуск. Указанные режимы отпуска позволяют увеличить температуру старения до 200 °С и снизить брак по макротрецинам и радиальной деформации винтов.

В процессе исследований и производственных испытаний установлено, что минимальная поводка винтов может быть получена при использовании стали марки 8ХФ с индукционной поверхностной или контурной закалкой.

Технологический маршрут термической обработки винтов из стали 8ХФ включает отжиг, стабилизирующий отпуск, закалку ТВЧ, отпуск и старение (табл. 4). Для закалки используют машинный генератор с частотой 8 кГц и вертикально-закалочный станок с автоматическим или ручным регулированием. Скорость подачи от 4 до 24 мм/с при 60 об/мин. Максимальные размеры винтов: длина 3000 мм, диаметр 100 мм. Для охлаждения применяют индуктор кольцевой двухвитковый: охлаждают водой или эмульсией через спрейер.

При температуре закалки 830—850 °С получают скрыто- или мелкоигольчатый мартенсит и поверхностную твердость HRC_9 64—66. В зависимости от шага глубина закаленного слоя состав-

4. Режимы термической обработки ходовых винтов из стали 8ХФ

Операция	Условные обозначения операции	Требования	Оборудование	Режим термообработки	Примечание
Отжиг	После отрезной операции по заключению центральной лаборатории заводской лаборатории	Твердость не более HB 255. Отсутствие пластиначатого и сорбического перлита в трубе 7 баллов по шкале № 1. Биение не более 2—2,5 мм. Биение не более 0,8—1,2 мм	Шахтная электрическая печь	Температура отжига 790±10 °С; время выдержки—4 ч; охлаждение вместе с печью со скоростью не выше 30 °С/ч до температуры 500—550 °С. Дальнейшее охлаждение вместе с печью до температуры 250—300 °С в воздушной атмосфере	При биении более 2,0—2,5 мм рихтовка на прессе П-415 и после этого высокий отпуск
Высокотемпературный отпуск	Перед чистовой точкой обработкой	То же	То же	Температура высокого отпуска 650—670 °С. Охлаждение вместе с печью до температуры 250—300 °С, затем — на воздухе	При биении более 0,8—1,2 мм рихтовка на прессе П-415 с повторным высоким отпуском. Биение не более 0,4 мм
Закалка ТВЧ	После токарной обработки или шлифования резьбовой части на винтах длиной более 1000 мм	HRC_9 59—61. Глубина слоя: для шага 5 мм — 2,0—2,5 мм; для шага 10 мм — 4,0—4,5 мм; для шага 20 мм — 5,5—6 мм HRC_9 59—61	Закалочный станок ПМ 25-06	Частота тока 8 кГц	Температура отпуска 190—210 °С. Среда — масло «Вапор»
Низкотемпературный отпуск	После отпуска	Не более член через 3 ч после закалки	Электродная печь-ванна	—	—
Промывка	После предварительной резьбшлифовальной операции	—	Ванна ПМ5108	Температура раствора 70—90 °С. Среда — 3—5% -ный раствор Na_2CO_3 . Температура старения 170—190 °С.	—
Старение	После отпуска	HRC_9 59—61	Электродная печь-ванна Н-3М	Среда — масло «Вапор»	—
Промывка	После старения	—	Ванна	Температура раствора 70—90 °С. Среда — 3—5% -ный раствор Na_2CO_3	—

тов из стали ХВГ при закалке с нагревом в шахтных печах достигает 10 мм. Кроме того, наблюдается неравномерная твердость. Для устранения этих недостатков на заготовках из стали ХВГ и 7ХГ2ВМ вместо первого стабилизирующего отпуска проводят отжиг. При этом устранение аустенитных участков стали 7ХГ2ВМ возможно при режиме: нагрев до 780 °С, выдержка после прогрева — 2 ч, охлаждение до 680 °С со скоростью 25—30 °С/ч, выдержка — 2 ч, охлаждение до 500 °С со скоростью 25 °С/ч, охлаждение на воздухе.

По наблюдениям отжиг (для стали ХВГ и нормализация с отпуском) повышает закаливаемость и уменьшает неравномерность твердости после закалки. Существенным является выбор температуры закалки и охлаждающей среды. Винты из стали ХВГ диаметром до 50 мм закаливают при температуре 830 °С, больших диаметров — при 840—850 °С.

Охлаждение производят в ванне, заполненной маслом индустриальным 20 при температуре 70—90 °С. Меньшая температура увеличивает деформацию винтов, а более высокая снижает твердость. Винты длиной свыше 1000 мм нагревают под закалку в печи типа СШЗ-6.30/10. Принято править нежесткие винты из стали ХВГ с биением до 2—3 мм. Неподдающиеся правке винты с биением 3 мм и больше подлежат отжижу и повторной закалке. Биение винтов длиной 2400 мм, диаметром 70 мм из стали 7ХГ2ВМ не превышает 1—1,5 мм. Отпуск закаленных деталей осуществляют в масляной ванне при постоянном перемешивании. Применение масла цилиндрового 52 позволяет довести температуру отпуска винтов из стали ХВГ до 250—290 °С, а винтов из стали 7ХГ2ВМ и 8ХФ — до 250—260 °С. Продолжительность отпуска 20—24 ч. Если на щлифовальных операциях биение возрастает или не устраивается, то винты отправляют на дополнительный пяти- и восьмичасовой отпуск. Указанные режимы отпуска позволяют увеличить температуру старения до 200 °С и снизить брак по макротрешинам и радиальной деформации винтов.

В процессе исследований и производственных испытаний установлено, что минимальная поводка винтов может быть получена при использовании стали марки 8ХФ с индукционной поверхностной или контурной закалкой.

Технологический маршрут термической обработки винтов из стали 8ХФ включает отжиг, стабилизирующий отпуск, закалку ТВЧ, отпуск и старение (табл. 4). Для закалки используют машинный генератор с частотой 8 кГц и вертикально-закалочный станок с автоматическим или ручным регулированием. Скорость подачи от 4 до 24 мм/с при 60 об/мин. Максимальные размеры винтов: длина 3000 мм, диаметр 100 мм. Для охлаждения применяют индуктор кольцевой двухвитковый: охлаждают водой или эмульсией через спрейер.

При температуре закалки 830—850 °С получают скрыто- или мелкоигольчатый мартенсит и поверхностную твердость HRC_9 64—66. В зависимости от шага глубина закаленного слоя состав-

4. Режимы термической обработки ходовых винтов из стали 8ХФ

Операция	Условия проведения операции	Требования	Оборудование	Режим термообработки	Примечание
Отжиг	После отрезной операции по заключению центральной лаборатории	Твердость не более HB 255. Отсутствие пластиначатого и сорбитного перлита в трубе 7 баллов по шкале № 1. Биение не более 2—2,5 мм Биение не более 0,8—1,2 мм	Шахтная электрическая печь	Температура отжига 790±10 °С; время выдержки—4 ч; охлаждение вместе с печью со скоростью не выше 30 °С/ч до температуры 500—550 °С. Дальнейшее охлаждение вместе с печью до температуры 250—300 °С в воздушной атмосфере	При биении более 2,0—2,5 мм рихтовка на прессе П-415 и после этого высокий отпуск
Высокотемпературный отпуск	Перед чистовой точкой обработкой	То же	—	Температура высокого отпуска 650—670 °С. Охлаждение вместе с печью до температуры 250—300 °С, затем — на воздухе	При биении более 0,8—1,2 мм рихтовка на прессе П-415 с повторным высоким отпуском. Биение не более 0,4 мм
Закалка ТВЧ	После токарной обработки или щлифования резьбовой части на винтах длиной более 1000 мм	HRC_9 59—61. Глубина слоя: для шага 5 мм—2,0—2,5 мм; для шага 10 мм—4,0—4,5 мм; для шага 20 мм—5,5—6 мм HRC_9 59—61	Закалочный станок ПМ 25-06	Частота тока 8 кГц	—
Низкотемпературный отпуск	Не более чем через 3 ч после закалки	—	Электродная печь-ванна	Температура отпуска 190—210 °С. Среда — масло «Вапор»	—
Промывка	После отпуска	HRC_9 59—61	Ванна ПМ5108	Температура раствора 70—90 °С. Среда — 3—5%-ный раствор Na_2CO_3	—
Старение	После предварительной резьбощлифовальной операции	HRC_9 59—61	Электродная печь-ванна Н-3М	Температура старения 170—190 °С. Среда — масло «Вапор»	—
Промывка	После старения	—	Ванна	Температура раствора 70—90 °С. Среда — 3—5%-ный раствор Na_2CO_3	—

ляет 2—6 мм. Переходная зона растянута с постепенным уменьшением твердости. Коробление винтов незначительное и в зависимости от длины и диаметра не превышает 0,1—0,4 мм.

Основными достоинствами этого процесса являются высокая производительность, снижение припусков и хорошая обрабатываемость заготовок из стали 8ХФ.

Представляет интерес горизонтальный закалочный комплекс, предназначенный для закалки с последующей рихтовкой и отпуском винтов длиной до 3 м. Винт устанавливают в патроне и люнетах. Для исправления возникшего после закалки коробления винта на машине находится специальная втулка. Расстояние от закалочного индуктора до втулки определено в зависимости от скорости перемещения винта и скорости его охлаждения таким, чтобы температура закаленного слоя снизилась до 180—200 °С, при которой сталь 8ХФ находится в пластичном состоянии. За рихтовочной втулкой на этой же машине расположен индуктор для низкого отпуска закаленного винта.

Закалке по контуру подвергают заготовки с предварительно обработанной резьбой. Закалку осуществляют под слоем жидкости на горизонтально-закалочном станке 53С и установке ЛЗ-1-25. На станке 53С закаливают винты длиной до 3 м диаметром до 100 мм и шагом 10—20 мм. Поверхностная твердость винтов из стали 8ХФ HRC_9 , 61—63, а глубина закаленного слоя 0,7—1,5 мм в зависимости от шага и диаметра. Коробление их невелико и не превышает 0,25 мм на винтах длиной 1600 мм.

Обладая рядом преимуществ, закалка по контуру уступает другим видам закалки в производительности, что не позволяет применять ее в массовом и серийном производстве.

Таким образом, с учетом конструктивных особенностей винтов и типа производства рекомендуется при единичном и мелкосерийном производстве изготавливать винты диаметром до 60 мм из стали ХВГ, выше 60 мм — из стали 7ХГ2ВМ, а в условиях крупносерийного производства — из стали 8ХФ.

Токарная обработка. Выбор размеров заготовки обусловлен величиной суммарного припуска на механическую обработку винта, который назначается с учетом следующих факторов: исходной кривизны прута, точности центрирования заготовки, величины радиальной деформации, возникающей в результате проведения предварительной термической обработки, суммарной погрешности последующих операций механической обработки, закалочной деформации, релаксации остаточных напряжений при старении, конструктивного исполнения винта. Наличие буртов предопределяет заведомо завышенный диаметр заготовки, что приводит к снижению коэффициента использования материала.

Фактическую кривизну заготовки определяют на основании статистических данных, и при использовании проката ее величина не превышает 4 мм/м. Для контроля прут устанавливают на призмы, расположенные на ровной поверхности. Измерения проводят индикатором (при небольшой кривизне) или штангенрейсмусом.

В условиях централизованного производства целесообразно вводить дополнительную операцию для уменьшения кривизны прутов. При использовании пластичной стали правку осуществляют растяжением, для чего используют установку на базе гидравлического горизонтального пресса П-444.

Техническая характеристика пресса П-444

Тяговое усилие, 10^6 мн	20
Наибольший ход плунжера, мм	450
Скорость хода, мм/с:	
рабочего	1,8
обратного	30
Давление рабочей жидкости, МПа	20
Диаметр растягиваемых прутов, мм:	
наибольший	70
наименьший	30
Длина растягиваемых заготовок, м	3,5—7
Габаритные размеры установки, мм	2240×2600×11 000

Правку производят следующим образом. Концы заготовки закрепляют в жестком упоре и на штоке гидроцилиндра, прикладывают усилие, достаточное для создания напряжений, несколько превышающих предел текучести, и заготовку растягивают до остаточного удлинения в 0,5—1 %. Остаточные напряжения снижаются или полностью снимаются в результате пластических деформаций. Оставшиеся после правки напряжения перераспределяются симметрично относительно оси заготовки. Такая правка позволяет уменьшать диаметр заготовок и величину биения на последующих операциях механической обработки винтов. Отрезку образцов и заготовок винтов производят на пилоотрезных либо ленточно-отрезных станках. Использование абразивно-отрезных станков нецелесообразно, так как при нагреве торцы заготовок закаливаются на глубину до 0,6 мм при твердости HRC_9 , 46,5—49. Последующая термообработка или устранение закаленных участков экономически нецелесообразны.

На образце маркируют номер партии, а на заготовках наносят номер детали. После этого в серийном производстве на станках-полуавтоматах МР-73, МР-75, 2К942, либо на станках с ЧПУ на базе станка 2К942 выполняют фрезерно-центровальную операцию. Простейшими являются двухпозиционные полуавтоматы, оснащенные двумя сверлильными головками. Настройка станка заключается в выставлении базирующих призм относительно оси шпинделей сверлильных головок. Смещение центрального отверстия относительно оси заготовок при правильной настройке станка не превышает 0,2—0,3 мм. Полуавтоматы барабанного типа одновременно со сверлением центральных отверстий обтачивают две шейки под патрон и люнет на концах заготовки. Наилучшие результаты получают на фрезерно-центровальных станках с ЧПУ (на базе станка 2К942), которые обрабатывают торцы, шейки и центральные отверстия комбинированным инструментом, а также сверлят, зенкуют и нарезают резьбу в резьбовых центральных отверстиях.

В единичном и мелкосерийном производстве заготовки зацентровывают при черновой токарной обработке. Черновую токарную обработку производят с целью устранения кривизны прута и обезуглероженного слоя, а также для формообразования заготовки винта. Для снижения радиальных припусков выполняют прибыли с технологическими центровыми отверстиями.

Применяемое для черновой обработки оборудование зависит от типа производства. В единичном производстве используют универсальные токарные станки, а в серийном применяют токарные станки с ЧПУ. Для обработки ходовых винтов длиной 2000 мм и больше в крупносерийном производстве применяют специальные станки с управляемыми по программе подвижными люнетами (мод. МК 6728, НС-1 и др.), а также станки с одним неподвижным люнетом, устанавливаемым в центре винта (мод. 16К20ФЗС), и двумя суппортами, позволяющими одновременно обрабатывать деталь с двух сторон, мод. 1К62Д.

Удаление припуска при повышенных режимах приводит к возникновению значительных остаточных напряжений. Для их снижения после черновой токарной операции требуется высокий отпуск, а при необходимости микроструктурных исправлений — отжиг.

Получистовую токарную обработку производят с перецентровкой. Для этого прибыли с технологическими центровыми отверстиями срезают, неподвижный люнет устанавливают на расстоянии от торца, примерно равном $1/6$ длины винта, и обрабатывают центровое отверстие. Правильное выполнение перецентровки позволяет снизить припуск на получистовую токарную обработку в 2 раза. На операции должна быть предусмотрена ликвидация концентраторов термических напряжений. Для этого выполняют плавные переходы между шейками разных диаметров, а на торце шейки под резьбу полукруглого профиля выполняют фаску под углом 30° к оси винта и диаметром, равным внутреннему диаметру резьбы. Эта фаска позволяет также исключить операцию заливания захода резьбы.

Режущий инструмент, применяемый на токарных операциях, — резцы с неперетачиваемыми твердосплавными трехгранными пластинами из Т15К6. Напыление твердосплавных резцов нитридом титана повышает производительность токарной обработки винтов при одновременном увеличении стойкости инструмента.

Режимы резания выбирают по общемашиностроительным нормативам. Жесткость винта и его коробление учитывают с помощью коэффициентов. Дробление стружки обеспечивается подбором режимов резания и соответствующей заточкой инструмента.

Закалка предъявляет повышенные требования к шероховатости поверхности резьбовой шейки ($R_a \leq 2,5$ мкм) по следующим причинам: во избежание задиров поверхности люнетами закалочного станка, для предотвращения термоударов в зоне гребешков шероховатости поверхности при закалке и обтирочном шлифовании. Поэтому винты с соотношением длины к диаметру свыше

15 перед закалкой шлифуют. При этом отклонения от цилиндрическости резьбовой шейки не должны превышать 0,05 мм.

Формирование резьбовой поверхности. Из анализа существующих технологических процессов изготовления ходовых винтов качения известно, что 25—60 % (в зависимости от конструкции винта и выбранной технологии) трудоемкости механической обработки приходится на формирование резьбовой поверхности. В настоящее время существует несколько технологических процессов механической обработки ходовых винтов качения, отличающихся методами резьбоформирования. Применение каждого из них определяется условиями обработки, наличием оборудования, типом производства, типоразмером и точностью обрабатываемых винтов.

5. Технологические процессы формирования резьбовой поверхности ходовых винтов качения

Варианты технологических процессов	До закалки резьбового слоя винта ТВЧ в кольцевом индукторе		Перед контурной закалкой профиля резьбы		На закаленной заготовке		Получистовое шлифование кругом	
	резцом	вихревой головкой	накатыванием	резцом	накатыванием	резцом	шлифовальным одно- или многониточным кругом	однониточным
I	+				+			+
II								—
III			+				+	—
IV								—
V							+	—
VI					—			—
VII		+		+		+		—

П р и м е ч а н и е. «+»—освоенные промышленностью технологические процессы; «—»—неосвоенные перспективные операции или операции, находящиеся на стадии разработки.

В табл. 5 приведены основные из этих технологических процессов, а в табл. 6 области их рационального применения. Технологические процессы, приведены в табл. 5, отличаются методом предварительного формирования резьбовой поверхности до или после термического упрочнения. Рассмотрим эти процессы более подробно.

Основными методами предварительного формирования резьбы до закалки являются нарезание резцом и накатывание. Нарезание резьбы резцом является универсальным методом, осуществимым в условиях любого производства на обычных токарно-винторезных станках, токарных станках с ЧПУ либо на специальных резьботокарных полуавтоматах. Однако его распространение ограничено,

6. Рациональные области использования различных технологических процессов резьбоформирования

Производство	Шаг винта, мм	Длина винта, мм	Вид технологического процесса (см. табл. 5)	
			действующий	перспективный
Крупносерийное и массовое	5	Для всех значений	IV	III
		До 500	I; II; IV	II; V
	10	500—1000	II; IV	II; V
		Более 1000	IV	II; V
	20	Для всех значений	III; IV	V
Среднесерийное	5	Для всех значений	IV	III
	10	До 1000	II; IV	II; V; VII
		Более 1000	IV	II; V; VII
	20	Для всех значений	III; IV	I; III; VI; VII
Мелкосерийное и единичное	5	Для всех значений	III; IV	I; III
	10	До 500	I; IV	I; III
		Более 500	IV	I; III
	20	Для всех значений	III; IV	I; III

так как последующая закалка вызывает значительные продольные деформации винтов и большое рассеяние этих деформаций. Так, при закалке в двухвитковом кольцевом индукторе на установке ПМ2606 с электроламповым генератором ЛЗ-107 винтов из стали 8ХФ типоразмера 63×10 удлинение составляет 1,2—1,8 мм на 1 м резьбовой части либо 12—18 мкм на шаг при следующих режимах: ток анода $I_a = 7$ А; ток сети $I_c = 2,2$ А; анодное напряжение $U_a = 9$ В;

мощность 85 кВт; частота 70 кГц. Для учета продольной деформации винта при закалке необходима тонкая коррекция его шага. Коррекцию осуществляют с помощью устройств ЧПУ или гитары сменных зубчатых колес, расчет которой производят по экспериментально полученным данным. С изменением условий закалки или материала заготовки значение продольных температурных деформаций винта также изменяется. Поэтому величину коррекции шага резьбы следует определять для каждого конкретного производства по партии винтов 15—17 шт. Это делает нерациональным предварительное нарезание резьбы ходовых винтов до закалки в единичном производстве.

При отсутствии коррекции для исправления погрешности шага резьбы последующим шлифованием необходимо снимать на боковых сторонах профиля резьбы увеличенный припуск. Это повышает трудоемкость получистовой операции шлифования резьбы, которая для винтов большой длины почти равна трудоемкости резьбошлифования по сплошной заготовке.

Как показала практика обработки ходовых винтов качения с полукруглым профилем резьбы, на винтах шагом 5 и 10 мм целесообразно нарезать резьбу до закалки резцом с радиусом 1,2—1,3 мм и 2,5—2,6 мм соответственно. При этом резьбу длиной 400—500 мм (шаг 10 мм) и 200—250 мм (шаг 5 мм) возможно нарезать до закалки без коррекции шага резьбы.

При коррекции шага резьбы на токарном станке допускаемая длина предварительно нарезаемой резьбы определяется рассеянием величины продольной деформации винтов при закалке. Так, при коррекции шага на 16 мкм на указанных винтах можно нарезать резьбу длиной до 1300—1400 мм и 650—700 мм соответственно. При объемной закалке винтов из стали ХВГ рассеяние величины продольной деформации увеличивается в 2—3 раза. В этом случае резьбу до закалки не нарезают.

Как указывалось выше, закалка по контуру профиля резьбы уменьшает в 10—15 раз величину продольных деформаций винта и поле их рассеяния по сравнению с закалкой в кольцевом индукторе. Это позволяет использовать технологию с предварительным формированием резьбы до закалки. Однако в настоящее время закалка по контуру осуществима для винтов с шагом не менее 10 мм.

Резьбу фрезеруют на аналогичных токарно-винторезных станках с последующей термической обработкой. Поэтому изложенное в равной степени относится и к этому способу резьбоформирования. При этом применяют специальный режущий инструмент — одно- или многорезцовую головку, которую устанавливают на суппорте токарно-винторезного станка и приводят в движение от отдельного электродвигателя.

В качестве режущего материала для фрез и резцов используют твердый сплав Т15К10. Напыление этих инструментов нитридом титана значительно повышает производительность обработки и стойкость режущей кромки инструмента.

Прогрессивным методом предварительного формирования резьбовой поверхности на незакаленных заготовках ходовых винтов является поперечно-винтовое накатывание. Зарубежные фирмы, изготавливающие винтовые пары качения, например такие как «Индустриал групп ротакс» [Industrial group Rotax] «Дженерал моторс» [General Motors Corporation], используют операцию накатывания для предварительного формообразования резьбы винтов различной точности.

Накатывание резьбы на винтах по сравнению с нарезанием резцом снижает трудоемкость предварительного резьбоформирования в 10—15 раз.

Так как при накатывании материал выдавливается из канавок, увеличивая наружный диаметр винта (для винтов с шагом 10 мм — на 4—5 мм), то это приводит к экономии 8—12 % металла. Винты с предварительно накатанной резьбой отличаются улучшенной обрабатываемостью резьбовой поверхности на последующих операциях, а также более высокой износостойкостью в эксплуатации.

Процесс накатывания осуществляют на двух- или трехвалковых прокатных станах, снабженных устройствами загрузки и выгрузки. Несовмещение осей прокатки, загрузочного и выгрузочного устройств вызывает поперечную деформацию винтов. Поэтому в таких станках необходимо предусматривать возможность выставления с большой точностью всех трех осей по одной прямой.

При накатывании резьбы винтов, как и при ее предварительном нарезании, необходимо корректировать величину шага резьбы, причем шаг резьбы винта определяется шагом резьбы валков, режимом накатывания и его стабильностью. Это вносит дополнительную сложность в наладку стана. В трехвалковом стане для каждого типоразмера винтов требуется отдельный комплект валков, переустановка которых трудоемка. В двухвалковом стане шаг резьбы винта регулируют в пределах 0,02 мм разворотом валков. Трудоемкость наладки стана на требуемый шаг и его высокая стоимость делают рациональным применение этого процесса только в серийном и массовом производстве.

Валки для накатывания специальной резьбы ходовых винтов изготавливают из хромистой стали, закаленной до твердости HRC_6 61—63.

Конструктивно валки выполняются с кольцевыми или винтовыми резьбоформирующими витками. В настоящее время чаще применяют валки с винтовыми витками. Рассмотрим последовательность расчета их профиля.

1. Расчет высоты профиля калибрующей части валка. Высота профиля витков валка определяется высотой профиля резьбы винта и способом накатывания: в закрытых калибрах наружный диаметр винта формируется внутренним диаметром накатных валков; в открытых калибрах наружный диаметр винта образуется в результате выдавливания металла из канавки, не касаясь внутреннего диаметра валка (рис. 7).

При первом способе накатывания заготовку выполняют с точ-

Рис. 7. Схема формирования резьбы винтов качеством накатыванием:
а — накатывание в закрытых калибрах; б — накатывание в открытых калибрах

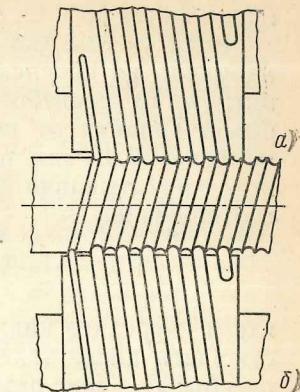
ностью по диаметру не ниже 0,05 мм, так как при диаметре заготовки меньше номинального прокатанные винты имеют неполную высоту профиля резьбы и наружный диаметр их меньше номинального. При диаметре заготовки больше номинального происходит переполнение металлов винтовых калибров валков, в результате чего резко возрастают давление металла на валки, крутящий момент на них, мощность, потребляемая приводом, и снижается стойкость валков; увеличиваются наружный и внутренний диаметры прокатанных винтов; происходит искажение геометрии впадины резьбы и ее шага. Заготовки под накатывание в этом случае шлифуют. Высота профиля валка равна высоте профиля накатываемой резьбы. Чтобы повысить точность накатывания по шагу в «закрытых калибрах», диаметр заготовки выбирают таким, чтобы на наружном диаметре накатанного винта оставалась незначительная канавка от неполного заполнения калибров (рис. 7). На глубину этой канавки увеличивают рассчитываемую высоту профиля накатываемой резьбы. Высота профиля накатываемой резьбы учитывает припуски по внутреннему и наружному диаметрам винта на все последующие обработки.

При втором способе накатывания в открытых калибрах высота профиля валка должна быть больше высоты профиля накатываемой резьбы на столько, чтобы при выдавливании металл заготовки не касался основания витка валка (рис. 7, б). Накатывание в открытых калибрах позволяет расширить допуск на диаметр заготовки до 0,15 мм и устранить операцию предварительного шлифования перед накатыванием. Однако при этом в 2,5—3 раза возрастает припуск по наружному диаметру, снимаемый после накатывания. Поэтому предварительное накатывание резьбы ходовых винтов качения в открытых калибрах, невзирая на большую стабильность продольных деформаций винтов, практически не применяют.

После выбора высоты профиля валков определяют его радиус.

2. Определение радиуса профиля. Радиус накатываемого профиля $r_1 = r_b - \Delta r_1$, где r_b — окончательный радиус профиля резьбы; Δr_1 — припуск на радиус резьбы под последующую после накатывания обработку.

Экспериментальные исследования показали, что закон рассеяния накопленной погрешности шага винтов в партии после накатывания, а также на последующих термических обработках соответствует нормальному, а накопленная погрешность шага резьбы



вдоль винта на всех операциях изменяется линейно по длине винта.

Если учесть, что резьбошлифовальный круг настраивают симметрично по среднему витку резьбовой части либо по крайним виткам, то, пренебрегая припуском на боковую поверхность резьбовой канавки от поперечной подачи круга, который составляет не более 0,01 мм, припуск на радиус резьбы под последующую после накатывания обработку достаточно точно можно определить соотношением

$$\Delta r_1 = k \left(1,5\sigma \frac{L_p}{P} + \Delta r_b \right), \quad (5)$$

где σ — среднее квадратическое рассеяние накопленной погрешности шага после закалки; k — коэффициент запаса; L_p — длина резьбы; P — шаг резьбы; Δr_b — припуск по радиусу на окончательное резьбошлифование.

Из анализа приведенной зависимости следует, что с увеличением случайной накопленной погрешности шага заготовок после закалки уменьшается либо радиус предварительно формируемой канавки либо возможная длина предварительного формирования резьбы.

3. Определение основного шага валков. Шаг валков определяют экспериментально по результатам накатывания и последующей термической обработки партии винтов. Величину партии определяют в зависимости от рассеяния накопленной погрешности шага на всех операциях. Так как наибольшее число изменяющихся факторов возникает на операции закалки (режим, охлаждение, качество металла заготовок, конструкция и установка индуктора, профессиональные навыки рабочего и др.), то здесь происходит и наибольшее рассеяние накопленной погрешности резьбы. Для наиболее полного учета случайных факторов при закалке партию накатанных винтов разбивают на несколько групп и закалку каждой группы производят со смещением во времени в несколько смен при различной настройке закалочной установки. Основной шаг валков

$$P_b = P + \Delta P_n + \Delta P_o + \Delta P_z,$$

где P — номинальный шаг накатываемой резьбы; ΔP_n — разность между шагом некорректированных валков и средним шагом резьбы после накатывания; ΔP_o — изменение шага резьбы после отпуска; ΔP_z — изменение среднего шага резьбы после закалки.

4. Расчет заборной части валков. Зaborный конус валков получают шлифованием полного профиля витков на круглошлифовальном станке либо настройкой гитары резьбошлифовального станка — за счет так называемой развалки витков.

Для осуществления развалки шаг валков на заборной части изменяют на величину $+\Delta P$ при шлифовании в направлении от калибрующей части и на величину $-\Delta P$ при шлифовании в направлении к калибрующей части валка. Значение ΔP рассчитывают в зависимости от высоты профиля валка на первом витке за-

борной части, высоты профиля калибрующих витков, длины заборной части и основного шага валка. Такая форма заборного конуса валков и острые вершины профиля на его витках улучшают течение металла в калибрах валков, обеспечивают равномерное осевое и радиальное обжатие заготовки по всей длине заборного конуса. Опыт ОЗПС показал, что биение винтов после накатывания такими валками уменьшилось в 2—2,5 раза.

После окончательного определения радиуса, высоты профиля, основного шага и шагов развалки валков их перешлифовывают на резьбошлифовальном станке. Коррекцию шага осуществляют подбором зубчатых колес гитары и механизма коррекции.

Рассмотрим пример наладки трехвалкового станка на накатывание полукруглой резьбы шагом 10 мм с окончательным радиусом профиля $r=3,12$ мм и высотой $h=2,13$ мм.

Из опыта закалки винтов с предварительно прорезанной резьбой принимаем радиус профиля валков равным 2,65 мм; высоту профиля с учетом канавки от незаполнения калибров, глубина которой составила 0,08—0,15 мм, принимаем равной 2,3 мм.

Наладку производили по партии винтов из трех групп по 7 шт. Каждую группу обрабатывали после перенастройки станка и закалочной установки. Режимы накатывания: шаг валков 9,977 мм; скорость вращения валков $v_b=0,035$ м/с; смазывающе-охлаждающая жидкость — сульфофрезол. После накатывания каждую группу подвергали высокому отпуску при температуре 600 °C в течение 6 ч. Закалку производили на установке ТВЧ ПМ 2606 при следующих режимах: ток анода $I_a=7$ А; ток сетки $I_c=2,2$ А; анодное напряжение $U_a=9$ кВ; мощность $N=85$ кВт; частота 70 кГц.

В результате статистической обработки результатов установлено, что распределение величины накопленной погрешности шага винтов в партии подчиняется нормальному закону. Средний шаг резьбы винтов после закалки составил 10,006 мм. (см. приложение 6).

Таким образом, для обеспечения среднего шага резьбы после закалки равным 10 мм необходимо, чтобы шаг валков составлял 9,971 мм. Поле рассеяния (6σ) погрешности шага резьбы винтов в партии составило 16 мкм. Согласно существующей технологии припуск на чистовое шлифование резьбы винтов качения составляет 0,05 мм. Тогда припуск на все операции шлифования резьбы после накатывания будет равен 0,42 мм. По формуле (5) определяем, при каком припуске можно накатывать винты длиной резьбовой части до 1050 мм. Для более длинных винтов радиус профиля необходимо уменьшить. При накатывании более коротких винтов радиус можно увеличить.

Черновое формирование резьбовой поверхности после закалки является трудоемким процессом и применяется для винтов, на которых предварительное формирование резьбы до закалки нецелесообразно или невозможно. Существуют два способа резьбоформирования на закаленной заготовке: нарезание резцом и шлифование однониточным либо многониточным кругом. Электрохими-

ческий способ формирования резьбовой поверхности на закаленной заготовке не нашел широкого применения, так как обладает высокой энергоемкостью и сопровождается выделением вредных веществ в окружающую среду.

Для черновой прорезки резьбы по сплошной заготовке применяют круги из монокорунда 44А16—25 МЗК8. Пропитка этих кругов бакелитовым лаком повышает их стойкость в 2 раза. Чтобы оставить в структуре круга пространство для размещения стружки, бакелитовый лак перед пропиткой подогревают до 50—60 °С. Кругов разбавляют ацетоном в соотношении 5 : 1. На черновых операциях применяют круги из хромититанистого электрокорунда. Электрокорунд в отличие от монокорунда изготавливают любой зернистости. Это позволяет использовать круги зернистостью 32—40; твердость круга при этом должна быть не ниже СМ1—СМ2. Круги из белого электрокорунда для прорезки резьбы ходовых винтовых винтов практически не применяют из-за их низкой режущей способности, вызывающей значительное снижение производительности обработки и появление шлифовочных дефектов в поверхностном слое резьбы.

Для обдирочного шлифования резьбы ходовых винтов применяют многониточные круги шириной до 40 мм. Осуществляют многониточную прорезку резьбы на резьбошлифовальных станках МВ127, МВ138 английской фирмы «Матрикс» (*Matrix*) и др. В настоящее время спроектированы и изготовлены отечественные специальные резьбошлифовальные станки МВ162 и МВ164, предназначенные для многониточного шлифования кругом шириной до 80 мм. Это позволит повысить производительность резьбошлифования в 2 раза при увеличении точности профиля резьбы.

Многониточный круг для шлифования резьбовой поверхности выполняют в виде ряда кольцевых витков, расположенных на расстоянии шага по его ширине. Ширина круга определяется конструктивными возможностями шпиндельного узла станка.

Основным этапом расчета многониточного круга является определение величины и конфигурации припуска, снимаемого каждой его ниткой. Расчет зависит от назначения круга и типоразмера шлифуемой резьбы.

Многониточные круги предназначены для обдирочного шлифования резьбы за один или несколько рабочих ходов и шлифования предварительно сформированной резьбы (получистовое и окончательное резьбошлифование).

Критерий распределения припуска по ниткам для кругов различного назначения выбирают с учетом требуемого качества и точности резьбовой поверхности, производительности, стойкости и оптимального распределения припуска.

Ниже рассмотрены основные принципы распределения припуска между нитками многониточных кругов.

На кругах для обдирочного шлифования резьбы распределение припуска между витками при одинаковой глубине шлифования вызывает разрушение ниток круга в направлении от последней

резьбоформирующей к первой, что снижает стойкость круга между правками. Кроме этого, при высокой интенсивности съема на резьбовой поверхности винта возникают шлифовочные дефекты.

При срезании каждой ниткой припуска одинаковой площади в осевом сечении винта улучшается качество поверхностного слоя и повышается стойкость круга между правками. Это объясняется тем, что с увеличением высоты шлифуемого профиля от первого к последнему режущему витку уменьшается глубина шлифования в опасном сечении на вершине круга и возрастает площадь пятна контакта круга с деталью. Интенсивность теплового потока, вводимого в деталь, определяемая отношением мощности шлифования (одинаковой для всех ниток) к площади контакта нитки с деталью, уменьшается. Это способствует снижению вероятности возникновения шлифовочных дефектов (прижогов и микротрешин) на окончательно сформированной поверхности. Так как сила резания, действующая на каждую нитку круга, одинакова, то при увеличении высоты профиля и, следовательно, площади контакта рабочей поверхности режущей нитки с деталью уменьшаются силы микрорезания, действующие на отдельные зерна круга. Таким образом увеличивается размерная стойкость ниток, окончательно формирующих профиль резьбы, и многониточного круга в целом. Распределение всего припуска по рассмотренному принципу возможно только для однопроходного резьбошлифования. Круг в этом случае рассчитывают по общему припуску, выраженному через площадь сечения шлифуемой резьбы F , и числу витков на круге n . Величина площади сечения среза на отдельной нитке $f = F/n$.

Для установленного значения f определяют режимы шлифования последним режущим витком круга. Исследуют качество поверхностного слоя резьбы на отсутствие дефектов при шлифовании на этих режимах однониточным кругом такой же характеристики.

Для данного станка проверяют выполнение неравенства

$$N_{\text{дв}} \geq k n N,$$

где $N_{\text{дв}}$ — мощность привода вращения круга, кВт; k — коэффициент; N — мощность шлифования однониточным кругом на установленных режимах, кВт.

Если неравенство не выполняется, целесообразность снижения мощности шлифования за счет уменьшения скорости вращения изделия либо за счет выполнения двух рабочих ходов при обработке определяют экономическим расчетом. Затем определяют высоту режущего профиля витков (рис. 8):

$$h_i = r \left(1 - \frac{\cos \alpha_i}{2} \right),$$

где r — радиус профиля; α_i — центральный угол сектора, образованного рабочим профилем i -го витка; α_i определяется графона-

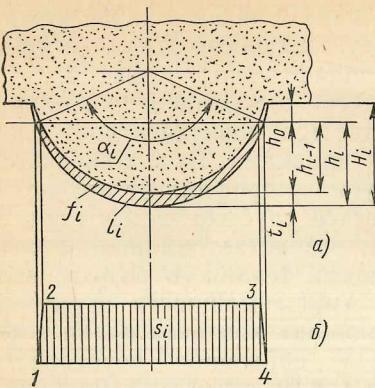


Рис. 8. Схема формирования резьбы винтов качения многониточным шлифовальным кругом:
а — сечение среза i -м витком многониточного круга; б — пятно контакта круга с резьбовой поверхностью на i -м витке

литическим методом из системы уравнений:

$$\begin{cases} z_1 = \sin \alpha_i; \\ z_2 = \frac{\pi \alpha_i}{180} - \frac{2F_i}{r^2}. \end{cases}$$

Глубину шлифования t_i либо приращение высоты профиля на каждом витке определяют как разность

$$t_i = h_i - h_{i-1}. \quad (6)$$

Определенную по формуле (6) глубину t_i сравнивают с допускаемой, при которой на промежуточных витках наличие дефектного слоя не превышает величину припуска, снимаемого следующими за ними нитками.

Полная высота профиля отдельной нитки круга $H_i = h_i + h_0$, где h_0 — высота нерабочей части профиля, пред назначенная для предотвращения одновременного шлифования многониточным кругом наружного диаметра винта.

Одновременное шлифование наружного диаметра винта влечет за собой нарушение точности базирования детали в люнетах. Кроме того, сплошной контакт круга с деталью на большой ширине приводит к возрастанию температуры в зоне контакта и соответственно к ухудшению качества поверхностного слоя и снижению точности обработки. Высота $h_0 = 0,3 \div 0,4$ мм.

Скорость резания v_{kp} и окружную скорость изделия v_i назначают с учетом требований к стойкости инструмента, качеству поверхностного слоя и приведенных затрат на операцию.

Результаты расчета параметров профиля восьминиточного резьбошлифования круга для обдирочного шлифования резьбы за один рабочий ход (радиус профиля $r = 1,44$ мм; высота профиля $h = 1,12$ мм; высота нерабочей части профиля витков $h_0 = 0,3$ мм) представлены в табл. 7. Для круга ЛД25СМ1К81100 % приняты следующие режимы резания: $v_{kp} = 45$ м/с; $v_i = 0,03$ м/с. В рассчитанном круге глубина шлифования на последнем витке на 40 % меньше, чем у круга с равномерным распределением припуска по виткам. Это снижает вероятность появления прижогов и микротрещин на поверхности резьбы и увеличивает стойкость круга между правками.

Экспериментальное определение износа I каждого витка рассчитанного круга показывает, что износ первого витка до-

7. Геометрические параметры восьминиточного круга для прорезки резьбы шагом 5 мм

Параметр профиля, мм	Номер витка							
	1	2	3	4	5	6	7	8
t_i	0,296	0,146	0,134	0,116	0,111	0,105	0,102	0,097
H_i	0,70	0,75	0,88	1,00	1,11	1,22	1,32	1,42
I_i	0,120	0,070	0,045	0,030	0,020	0,010	0,005	—

стигает максимальной величины 0,12 мм, а последний практически не изнашивается. Это вызывает увеличение расхода материала инструмента в целом. Поэтому такое распределение припуска между витками целесообразно использовать для сравнительно недорогих корундовых кругов.

Увеличить общую стойкость многониточного круга за счет снижения его расхода во время правки, не уменьшая при этом производительности, можно, приблизив износ всех его ниток к одинаковому значению. Рассмотрим стойкость отдельного витка круга как результат влияния двух факторов: силового воздействия на зерно и нагрева, снижающего прочность связки. Силовое воздействие на круг может быть учтено отношением мощности резания N к площади пятна контакта круга с деталью S . Если не учитывать влияние температурного фактора, то при постоянном отношении N/S стойкость витков круга должна быть одинаковой.

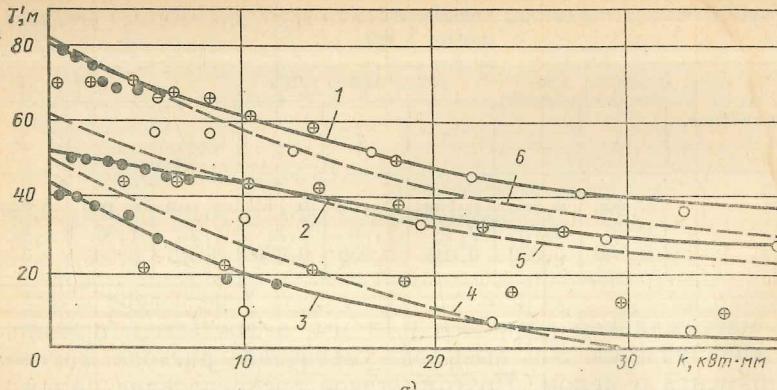
Площадь пятна контакта круга с деталью с достаточной точностью может быть определена как площадь трапеции (см. рис. 8):

$$S_i = \frac{l_{i-1} + l_i}{2} l_k,$$

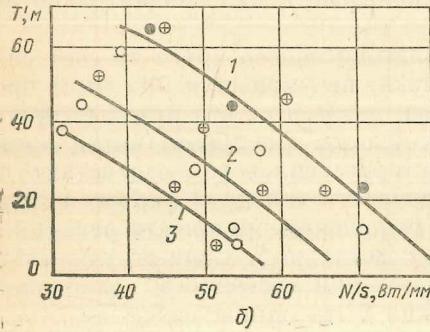
где l_i — длина дуги профиля в нормальном сечении; l_k — длина дуги контакта круга с деталью.

При одинаковой глубине шлифования на всех нитках круга значение N/S уменьшается от первого к последнему витку. Однако, как указывалось выше, стойкость витков такого круга не возрастает, а падает в том же направлении.

Известно также, что при черновом резьбошлифовании ходовых винтов качения однониточными кругами размерная стойкость круга падает с увеличением радиуса шлифуемого профиля резьбы при том же значении N/S и высоты профиля. Это объясняется влиянием температурного фактора. Так как теплопроводность резьбошлифовальных кругов очень низка, теплоотвод в круг происходит медленно. Наибольший нагрев происходит на вершине витка, так как вершина наиболее удалена от участков, где во время резания происходит интенсивное охлаждение круга. Кроме того, на вершине удельная мощность шлифования наибольшая. Степень нагрева определяется конфигурацией витка, размерами, а также количеством теплоты, которая попадает в круг.



a)



b)

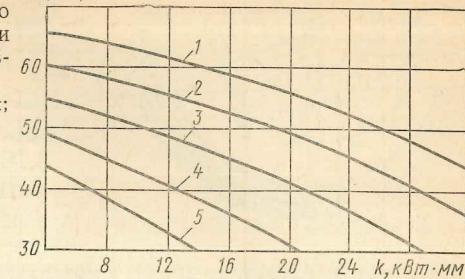
Рис. 9. Зависимость стойкости круга Э9125СМ18К5 между правками от теплового критерия (а) и удельной мощности (б) при обработке с режимами $v_{kp}=44$ м/с, $v_u=0,03$ м/с:
 а — 1 — $t=0,1$ мм; 2 — $t=0,2$ мм; 3 — $t=0,3$ мм; 4 — $N/S=60$ Вт/мм²; 5 — $N/S=50$ Вт/мм²; 6 — $N/S=40$ Вт/мм²; б — 1 — $k=6$; 2 — $k=18$; 3 — $k=30$

Известно, что чем больше общая мощность шлифования, тем большее количество теплоты идет в круг. Размеры профиля резьбы приближенно можно оценить по углу при вершине профиля α и расстоянию от вершины профиля до охлаждаемой поверхности (длине дуги l). Произведение этих трех параметров может характеризовать тепловой режим работы отдельного витка круга при чистовом шлифовании.

Проверка зависимости стойкости круга от указанного критерия $k=aN=a^2rN$ показала, что при одинаковом значении силового критерия N/S стойкость круга T' для винтов различных типоразмеров падает с возрастанием k (рис. 9, а). При одинаковом значении температурного критерия стойкость круга определяется отношением N/S (рис. 9, б). Таким образом, чтобы обеспечить одинаковую стойкость всех ниток многониточного круга, необходимо выдерживать для каждого витка определенное соотношение значений силового и температурного критериев (рис. 10). Расчет восьминиточного круга для обдирочного шлифования резьбы шагом $P=5$ мм (радиус профиля $r=1,44$ мм; высота профиля $h=1,12$ мм) по рассмотренному принципу позволил получить следующее распределение глубин шлифования в направлении от первой к последней нитке: 0,160; 0,155; 0,150; 0,145; 0,130; 0,115; 0,100 мм.

Рис. 10. Зависимость удельной мощности шлифования от температурного критерия при одинаковой стойкости круга Э9125СМ18К5 между правками:

1 — $T'=20$ м; 2 — $T'=30$ м; 3 — $T'=40$ м;
 4 — $T'=50$ м; 5 — $T'=60$ м



Так как мощность шлифования на отдельном витке многониточного круга определяется площадью сечения среза этим витком f_i , то расчет многониточных кругов по одинаковой стойкости ниток можно производить, не прибегая к определению мощности шлифования.

При обработке резьбы с большим радиусом профиля ($r \geq 2,5$ мм) многониточными кругами по сплошной заготовке шлифование канавки до заданных размеров за один рабочий ход на известных резьбошлифовальных станках практически невозможно. Формирование резьбы за несколько рабочих ходов вызывает изменение (от одного рабочего хода к другому) величины температурного критерия для каждого витка круга и соответственно его стойкости и качества поверхностного слоя.

Так как точность профиля, шага и качество поверхностного слоя формируются на последнем проходе, то глубину шлифования на каждом витке многониточного круга определяют с точки зрения оптимальных условий работы круга на последнем рабочем ходе. При этом может быть использована рассмотренная методика.

При значительном числе рабочих ходов и небольшом числе ниток на круге распределение припуска, выбранное из условий работы круга на последнем рабочем ходе, сводится к одинаковой глубине шлифования на всех витках. Это снижает производительность обработки, так как все витки круга, кроме первого (на нем глубина шлифования определяется величиной поперечной подачи), на предшествующих последнему рабочих ходах работают на заниженных режимах. На таком круге за период стойкости между правками больше изнашиваются первый и последний режущие витки.

Чтобы повысить интенсивность съема металла и стойкость средних витков, следует использовать усредненную глубину шлифования для каждого витка на каждом рабочем ходе. При этом должно быть выдержано условие: глубина прижога от каждой нитки не должна превышать припуска, снимаемого нитками, следующими за ней.

Результаты расчета глубины шлифования на витках четырехниточного круга по изложенной методике для резьбы с радиусом

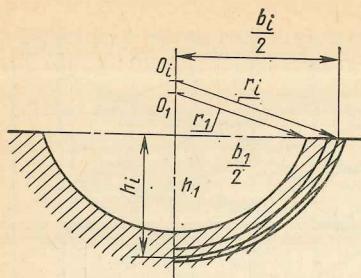


Рис. 11. Схема для определения радиуса профиля витков многониточного круга при шлифовании предварительно сформированной резьбы

$r = 2,92$ мм, $h = 2,12$ мм следующие: первый виток — 0,18; 0,17; 0,16; второй — 0,14; третий — 0,12, четвертый — 0,10 мм.

Особенностью получистового шлифования резьбы является не равномерное распределение снимаемого припуска на боковых сторонах резьбовой канавки. Это вызвано различием радиусов шлифуемого профиля и профиля заготовки, особенно в случае предварительного формирования резьбы до закалки.

Согласно статистическим данным продольная деформация резьбы после закалки или обтирочного шлифования по закаленной заготовке изменяется линейно. При этом настройку круга на обработку осуществляют таким образом, чтобы его профиль располагался симметрично профилю резьбы среднего витка резьбовой части винта. По мере удаления от места настройки круга, в зависимости от продольной деформации винта, происходит смещение припуска на одну сторону профиля. При шлифовании в таких условиях многониточным кругом с одинаковым радиусом профиля по всем режущим ниткам основная часть этого припуска снимается первой режущей ниткой. Это может привести к ее преждевременному изнашиванию, разрушению и перераспределению припуска на остальные нитки. Стойкость такого круга низкая. Выделение теплоты, сконцентрированной на небольшом участке профиля, увеличивает контактную температуру и приводит к появлению шлифовочных дефектов. Для предотвращения этого при шлифовании многониточным кругом с одинаковым профилем витков увеличивают число рабочих ходов, что снижает производительность обработки.

Наиболее целесообразное распределение припуска обеспечивается при изменении высоты режущего профиля витка и его радиуса. При ширине канавки b радиус профиля витка круга (рис. 11)

$$r = (b^2 + h^2)/2h.$$

В таком круге припуск равномерно распределен по профилю. Это позволяет наиболее полно использовать режущие свойства всех участков рабочего профиля витка и уменьшает теплонапряженность процесса. При наличии накопленной погрешности шага резьбы полным профилем на всей длине резьбовой части будет работать только последний виток круга. На промежуточных витках круга пятно контакта нитки с деталью будет перемещаться в течение рабочего хода с одной стороны режущего профиля на другую и только в центре все нитки будут работать полным профилем

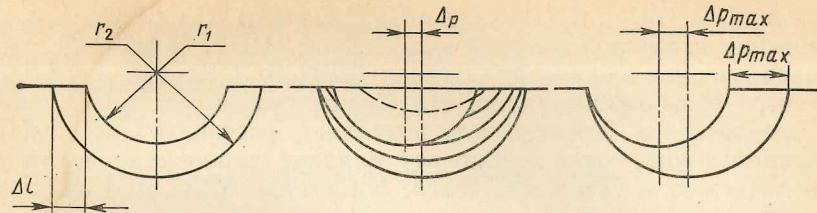


Рис. 12. Распределение припуска вдоль профиля резьбы на получистовой операции:

r_1 — радиус канавки, прорезанной до закалки; r_2 — радиус канавки при получистовом резьбошлифовании; Δ_P — накопленная погрешность шага при закалке; Δl — припуск на получистовую обработку

(рис. 12). Промежуточные витки такого круга будут меньше нагружены. Разрушение в первую очередь будет происходить на первом и последнем режущих витках. Поэтому, чтобы повысить общую стойкость круга, необходимо уменьшить съем металла на последней нитке за счет его увеличения на промежуточных.

При расчете первого режущего витка необходимо исходить из максимально возможного увеличения припуска с учетом продольной деформации винта и ожидаемого при этом изменения стойкости. Расчет по изложенной методике дал следующее распределение припуска между нитками четырехниточного круга для шлифования предварительно накатанной резьбы радиусом $r_1=2,65$: припуск по внутреннему диаметру 0,2 мм; высота профиля $h=2,13$ мм; радиус профиля после шлифования $r_2=3,07$ мм; радиус в направлении к последнему витку — 2,65; 2,85; 2,98; 3,07 мм; высота профиля — 2,03; 2,12; 2,13; 2,135 мм.

Оборудование и инструмент для чистового шлифования резьбы. Для чистовой обработки резьбовой поверхности ходовых винтов, в том числе поверхности качения, применяют специальные резьбошлифовальные станки.

Особенность резьбошлифовальных станков для шлифования ходовых винтов заключается в применении упрощенной кинематической схемы, изготовлении более жесткой станины и стола станка, применении системы коррекции накопленной и периодической погрешности шага и оснащении станка холодильной установкой, стабилизирующей температуру СОЖ в пределах $\pm 0,5^\circ\text{C}$.

Резьбошлифовальные станки для ходовых винтов выполняют двух компоновок: с перемещающимся стоком и с перемещающейся шлифовальной бабкой. Схема обработки с подвижным столом предпочтительна, так как исключает перенос значительной части погрешностей направляющих на шаг шлифуемой резьбы. Недостатком такой компоновки резьбошлифовальных станков являются их большие габаритные размеры, что вызывает увеличение занимаемой площади в 1,7—2 раза.

В СССР выпускаются станки с подвижным столом для шлифования резьбы ходовых винтов качения нескольких моделей.

Станки МВ127 и 5Д822ВС1 предназначены для обработки ходовых винтов длиной до 1500 мм. Станок МВ127 используют для предварительной обработки. Станок 5Д822ВС1 предназначен для чистового резьбошлифования. На станке применяют более жесткие трехточечные люнеты, что позволяет выставить заготовку с требуемой точностью и исключает влияние коробления винта на периодическую погрешность шага. На станке 5Д822ВС1 установлены жесткая задняя бабка, кожух и устройство для отсоса масляных паров. Станок оснащен приспособлениями для правки круга полукруглого профиля алмазными резцом и роликами. Чугунная станина станка имеет жесткую коробчатую форму. По направляющим качения станины перемещается стол. Стальные ленты предохраняют направляющие от попадания грязи и абразивной пыли.

Коррекцию накопленной погрешности шага осуществляют с помощью коррекционной линейки, помещенной на передней стороне стола. Коррекционная линейка состоит из отдельных секторов, изготовленных из органического стекла. Величина поворота коррекционной линейки для изменения линейной составляющей накопленной погрешности шага указана в таблице, закрепленной на передней стенке стола. Величину смещения отдельных секторов линейки для коррекции нелинейной составляющей накопленной погрешности шага рассчитывают по формулам, приведенным в паспорте станка. Погрешность шага в пределах оборота на станке 5Д822ВС1 корректируется с помощью эксцентричного зубчатого колеса, расположенного на оси ходового винта станка. Предназначен станок для обработки ходовых винтов класса точности В.

Техническая характеристика станка 5Д822ВС1

Максимальное межцентровое расстояние, мм	1500
Наибольшая длина шлифуемой резьбы, мм	1400
Диаметр шлифуемого изделия, мм	150
Высота центров, мм	105
Частота вращения изделия, об/мин	0,5—64
Мощность электродвигателя привода изделия, кВт	2,5
Частота вращения шлифовального круга, об/мин	1400
Мощность электродвигателя привода шлифовальной бабки, кВт	7,5
Диаметр шлифовального круга, мм	400
Наибольшая устанавливаемая ширина шлифовального круга, мм	40
Шаг шлифуемой резьбы, мм	1—24
Наибольший угол поворота шлифовального круга для резьб, градусы:	
правой	15
левой	15

Станок МВ140 предназначен для шлифования резьбы качения ходовых винтов класса точности П длиной до 3000 мм. По сравнению с предыдущими моделями отличается повышенной жесткостью узлов и увеличенной мощностью привода изделия и шлифовального круга.

Станки с неподвижным столом и перемещающейся шлифовальной бабкой более компактны и при высокой точности изготовления

и сборки их отдельных узлов и деталей обеспечивают обработку ходовых винтов по классу точности В. Такую компоновку имеют станки, выпускаемые английской фирмой «Конвентри гейдж энд тул компани» (*Coventry Gauge and Tool Company*).

Техническая характеристика станка «Matrix 71»

Диаметр шлифуемого изделия, мм	266,7
Внутренний диаметр шпинделя передней бабки, мм	152,4
Максимальное межцентровое расстояние, мм	2286
Наибольшая длина шлифуемой за один установ резьбы, мм	1778
Частота вращения изделия, об/мин	0,32—15
Мощность электродвигателя привода изделия, кВт	1,25
Частота вращения шлифовального круга, об/мин	1000—2000
Мощность электродвигателя привода шлифовальной бабки, кВт	13,5
Диаметр шлифовального круга, мм	508
Наибольшая устанавливаемая ширина шлифовального круга, мм	77,5
Шаг шлифуемой резьбы, мм	0,5—150
Наибольший поворот шлифовального круга для резьб, градусы:	
правой	45
левой	43

Станки «Matrix 62» и «Matrix 47» (Англия) отличаются от станка «Matrix 71» только расстоянием между центрами: 1522 и 1000 мм соответственно.

Станок «Matrix 70» предназначен для шлифования резьбы на ходовых винтах длиной до 5000 мм без переустановки. Ходовые винты диаметром до 150 мм и длиной до 15 000 мм можно обработать с переустановкой их в патроне и люнетах. Недостатком всех станков модели «Matrix» является отсутствие коррекции нелинейной составляющей накопленной и внутришаговой погрешности резьбы.

Станки швейцарской фирмы «Рейсхайэр» (*Reishauer*) обеспечивают обработку ходовых винтов по классу точности А и выпускаются с подвижным столом. Станок модели VL-1800 (Швейцария) с максимальным межцентровым расстоянием 1800 мм обеспечивает точность обработки по шагу: в пределах одного оборота — 2 мкм, на длине 300 мм — 4 мкм, на длине 1000 мм — 7 мкм, на длине 1800 мм — 12 мкм. Достигают такой высокой точности за счет постоянной температуры ходового винта станка, которую обеспечивают непрерывной подачей на винт охлаждающей жидкости с постоянной температурой.

Дальнейшее повышение точности резьбообрабатывающих станков в настоящее время достигают за счет применения систем ЧПУ. Так, на базе станка GKC-2000 западногерманской фирмы «Линдер» (*Linder*) выпускается станок с ЧПУ «Sinumerik 714», в котором геометрические отклонения от исполнительных размеров фиксируются измерительной системой, подающей сигнал рассогласования в систему ЧПУ. Система ЧПУ компенсирует указанные отклонения за счет согласования вращения изделия и его продольного перемещения. Применение системы ЧПУ позволило при высокой точности

сти обработки использовать схему с подвижной шлифовальной бабкой, что сделало станок более компактным.

На базе станка GSN-1000, выпускаемого японской фирмой «Мицубиси сейки» (*Mitsui Seiki*), изготовлен станок с ЧПУ «Фанис» с межцентровым расстоянием 1200 мм и длиной обрабатываемой резьбы до 1000 мм. Система ЧПУ обеспечивает коррекцию продольного и поперечного перемещений шлифовальной бабки и правку круга. Особенностью данного станка является также подача СОЖ как в зону резания, так и по всей длине винта.

Для шлифования резьбы полукруглого профиля на рассмотренных резьбошлифовальных станках применяют круги, изготовленные в СССР, а также английскими фирмами «Нортон» (*Norton*), «Карборунд» (*Carborund*) и «Юниверсал гриндинг уил» (*Universal Grinding Wheel*). Хорошие результаты при чистовом шлифовании винтов качения с шагом 5 и 10 мм, показали круги типоразмера ПП 500×10×305 характеристики 80—100 KV и 80KV.

При обработке точных ходовых винтов значительной длины к шлифовальному кругу предъявляют следующие требования: во-первых, он должен достаточно длительное время сохранять заданный профиль, чтобы обеспечить постоянство шлифуемого профиля резьбы на всей длине винта; во-вторых, его режущие свойства должны обеспечивать требуемые параметры шероховатости при отсутствии прижогов и микротрещин. Кроме того, режущие свойства круга должны сохраняться длительное время без изменения, чтобы обеспечить постоянство мощности резания, а следовательно, и температурных деформаций винта при обработке на режимах, обеспечивающих максимальную производительность.

В настоящее время для шлифования резьбы ходовых винтов качения применяют круги из белого электрокорунда, монокорунда, хромититанистого электрокорунда. Иногда для улучшения режущих свойств и повышения размерной стойкости этих кругов применяют их импрегнирование различными составами: серой, бакелитом, жидким стеклом и др.

Высокая режущая способность и стойкостные качества эльборовых кругов предопределили их широкое использование для финишного резьбошлифования прецизионных ходовых винтов. Однако высокая стоимость этого материала требует тщательного подхода при выборе рациональной характеристики круга.

При выборе характеристики резьбошлифовального круга из эльбора, учитывая его высокую стоимость, необходимо исходить из стойкости круга до полного изнашивания с ограничением его стойкости между правками и обеспечением требуемого качества шлифуемой поверхности.

Известно, что повышенная стойкость эльборовых кругов объясняется, во-первых, высокой механической прочностью эльбора, во-вторых, его способностью изнашиваться не истиранием, а скользанием и микроскальванием вершин [15]. При разрушении эльборового зерна образуется более устойчивая, затупленная вершина, причем по сравнению с другими абразивными материалами

этот процесс значительно растянут во времени. Затупленные эльборовые зерна в зависимости от твердости связки могут оставаться в круге, ухудшая процесс резания, либо выкрашиваться, разрушая поверхностный слой круга (круг самозатачивается). Режущие свойства самозатачивающегося круга, а следовательно, и мощность шлифования остаются постоянными длительное время. Изнашивание круга происходит по всему профилю. Так как прессование эльборовых кругов при их изготовлении ориентирует зерна в рабочем слое параллельно торцам, это вызывает меньшее изнашивание круга по торцам, чем по периферии.

Повышенному изнашиванию периферии круга при полукруглом профиле резьбы способствует также увеличение мощности шлифования на вершине профиля круга. Указанные особенности изнашивания круга вызывают искажение профиля, приближенно соответствующее увеличению его радиуса. При работе кругов в режиме самозатачивания момент правки, определяемый по нарушению точности профиля резьбы, трудно зафиксировать. Это вызывает дополнительные затраты времени на измерение, либо, что чаще всего, — преждевременную правку круга для гарантированного обеспечения точности профиля шлифуемой резьбы. При использовании недостаточно твердых кругов увеличивается износ между правками. Кроме того, из-за неравномерной твердости мягких кругов увеличивается глубина правки для восстановления геометрической точности круга $t_{\text{пр}}$.

Если обозначим стойкость круга до полного изнашивания через T , а между правками — через T' , то $T = nT'$, где n — число правок круга до полного изнашивания; $n = (A - h)/(a + t_{\text{пр}})$; здесь A — толщина эльбороносного слоя на круге; h — высота профиля.

Тогда

$$T = \frac{A - h}{a + t_{\text{пр}}} T'.$$

Как видно из этой формулы, увеличение a и $t_{\text{пр}}$ может вызвать значительное снижение общей стойкости круга даже при большой стойкости T' . Поэтому такой характер изнашивания круга при высокой стабильности тепловыделения в зоне резания может привести к повышенному расходу эльбора.

С повышением твердости круга стойкость между правками начинает ограничиваться не потерей формы профиля, а затуплением круга. При этом увеличивается стойкость круга между правками за счет более длительного сохранения им заданного профиля. Одновременно, повышение твердости вызывает снижение стойкости круга между правками за счет быстрого затупления. Режущая поверхность затупленного круга покрывается частицами налипшего металла. Точность профиля при этом сохраняется. Время работы круга повышенной твердости между правками сокращается, что в конечном итоге снижает его стойкость до полного изнашивания.

Совместными работами ВНИИАШа и ОЗПС установлено, что для обеспечения параметра шероховатости поверхности резьбы ходовых винтов качения $R_a = 0,63$ мкм эльборовыми кругами на ке-



Рис. 13. Влияние твердости круга на его стойкость:

а — между правками; б — до полного изнашивания круга. Режимы обработки: $v_{kp} = 45 \text{ м/с}$; $v_u = 0,1 \text{ м/с}$; $t = 0,04 \text{ мм}$; $r = 3,12 \text{ мм}$;
 — круги L12M2—CM2K8 100 %;
 — круги L10M2—CM2K8 100 %

рамической связке С10 концентрации 100 % зернистость кругов должна быть не более 10—12. Основным параметром круга, характеризующим его стойкость, является твердость связки. Определение рациональной твердости связки производилось экспериментально, по результатам исследования работы кругов указанной характеристики твердостью от М2 до С1.

Результаты исследования влияния твердости на стойкость круга представлены на рис. 13. Как показывает анализ, рациональная область твердости связки, при которой полная стойкость круга Л12 максимальная, а стойкость между правками обеспечивает длительное сохранение его режущих свойств, находится в пределах М3—СМ2. В этом диапазоне затуплению круга сопутствует его частичное самозатачивание, увеличивающее время работы между правками и радиус профиля, который в момент затупления равен 3,13—3,135 мм.

Такое же изменение радиуса профиля наблюдалось и на моно-корундовых кругах 44А12М28К5 после обработки на режимах: $v_{kp} = 35 \text{ м/с}$; $v_u = 0,04 \text{ м/с}$; $t = 0,03 \text{ мм}$. При этом стойкость между правками составляла 23—30 м винтовой линии. Это в 10—12 раз меньше стойкости эльборовых кругов. Так как допускаемое колебание радиуса профиля резьбы на всей длине винта не должно превышать 2,5—6 мкм, выполнение этого требования при обработке кругом 44А12М28К5 на указанных режимах для винтов с резьбовой частью длиной 1500 мм и больше практически невозможно. В таких случаях необходимо значительно снижать режимы шлифования либо применять круги типа эльборовых.

При снижении твердости эльборового круга до М2 круг самозатачивается. Стойкость круга между правками высокая. Момент правки определяется потерей точности профиля. Стойкость круга до полного изнашивания уменьшается в 1,5 раза из-за увеличения расхода эльбора при шлифовании и глубины правки. Круги твердостью С1 показали низкую стойкость между правками, поэтому

до полного изнашивания эльбороносного слоя они не испытывались.

С уменьшением зернистости круга до Л10 область рациональной твердости смещается в сторону ее уменьшения. При твердости СМ2 наблюдается ухудшение режущих свойств круга зернистостью Л10 и соответственно снижение стойкости между правками и общей стойкости. Радиус профиля при этом практически не изменяется.

С уменьшением шага шлифуемой резьбы уменьшается допуск на геометрические размеры ее профиля. При этом стойкость круга, работающего в режиме самозатачивания или частичного самозатачивания как между правками, так и до полного изнашивания, уменьшается.

Использование в качестве режущего материала круга эльбора из-за высокой стабильности мощности резания позволяет применять многониточное резьбошлифование на финишной операции. При этом если круг спрофилировать по принципу увеличения радиусов витков, тепловой поток в винт по длине будет колебаться на всех витках круга, предшествующих последнему, в зависимости от продольных деформаций, увеличивая таким образом колебание накопленной погрешности шага при обработке. Так как неравномерное распределение припуска, обусловленное продольными деформациями винта на получистовой операции, не превышает 0,04—0,05 мм, то этот припуск удаляется первым витком многониточного круга. Поэтому радиус профиля круга на этом витке должен быть равен его окончательному значению. На стойкость круга и качество поверхностного слоя резьбы это не окажет значительного влияния. Припуск, снимаемый промежуточными витками, необходимо распределить равномерно, что при высоте профиля, близкой к окончательной, будет соответствовать их одинаковой стойкости (см. рис. 13).

Последний виток многониточного круга обеспечивает точность геометрических параметров профиля резьбы и оказывает определяющее влияние на качество поверхностного слоя по физико-механическим свойствам и параметрам шероховатости поверхности. Изменение температурного поля в зоне резания последнего витка по сравнению с изменением температурного поля в зоне резания витков, предшествующих последнему, в наименьшей степени влияет на погрешность обработки ходовых винтов. Поэтому на последнем режущем витке многониточного круга для окончательного шлифования резьбы ходовых винтов режим обработки должен быть наименее теплонасыщенным и наиболее стабильным во времени, что достигается предельным уменьшением глубины шлифования на витке. Минимальную глубину снимаемого припуска на последнем витке t_p определяют из условия исправления погрешности шлифуемого профиля резьбы, обусловленной погрешностью шага между витками круга γ (рис. 14), по формуле

$$t_p = h - r - \sqrt{(r-h)^2 + 2\gamma\sqrt{2rh - h^2 - \gamma^2}}.$$

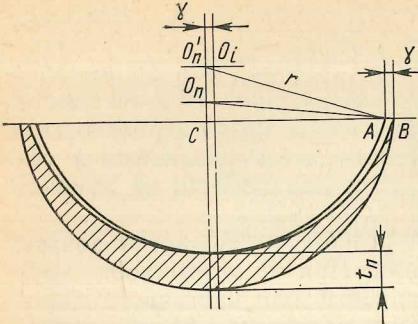


Рис. 14. Схема для расчета минимальной глубины шлифования на последнем витке многониточного круга

Рассчитанная по этой формуле минимальная глубина шлифования последнего витка при $v = 0,008$ мм, $r = 3,12$ мм и $h = 2,13$ мм составила 0,018 мм.

Определение режимов чистового шлифования резьбы. При назначении повышенных режимов шлифования резьбы ходовых винтов качения снижается качество поверхности и точность. Кроме того, интенсификация режимов приводит к преждевременному разрушению (затуплению) режущего рельефа круга и вызывает необходимость частой правки. При использовании алмазных и эльборовых кругов этот фактор существенно влияет на себестоимость операции. Поэтому при выборе рациональных режимов чистового шлифования резьбы ходовых винтов качения эльборовыми кругами необходимо выдерживать следующие требования: отсутствие шлифовочных дефектов на обработанной поверхности; шероховатость резьбы в пределах заданной; стойкость круга не менее заданной; минимальные приведенные затраты на операцию. С учетом этого ниже приведена последовательность определения режимов чистового резьбошлифования.

В качестве режущего инструмента принят круг Л12СМ1К8 100 %, заправленный алмазным роликом зернистостью 400/315, концентрацией 100 %, работающий с режимами: $v_{kp} = 22,5$ м/с; $v_p = 7$ м/с; $t = 15$ с.

В порядке последовательности ограничения области режимов шлифования в первую очередь определялись режимы, исключающие наличие температурных дефектов обрабатываемой поверхности, контроль которых осуществляют, например, методом травления 10 %-ным раствором азотной кислоты, на магнитном дефектоскопе или измерением микротвердости на микрошлифах.

Установлено, что при шлифовании со скоростью резания $v_{kp} = 25 \div 50$ м/с, окружной скоростью изделия $v_u = 0,01 \div 0,14$ м/с, глубиной шлифования $t = 5 \div 50$ мкм прижоги любого вида (точечный, штриховой, сплошной и др.) и микротрешины на поверхности резьбы не появляются.

Дальнейшее увеличение режимов резания зависит от стойкости круга и шероховатости поверхности. Для этого исследована зависимость стойкости круга между правками T' и параметра шероховатости Ra от скоростей вращения круга v_{kp} и изделия v_u , глубины шлифования t . Так как диаметр эльборового круга за время изнашивания уменьшается всего на 4—5 %, а уменьшение диаметра изделия от 35 до 80 мм (диапазон, включающий свыше 90 % выпускаемых ходовых винтов качения) вызывает изменение тол-

щины среза отдельным зерном круга не более чем на 12—13 %, то влияние этих факторов не учитывается. Для определения аналитических зависимостей T' и Ra от режимов шлифования использован метод математического планирования многофакторного эксперимента с последующей стандартной обработкой результатов. Результаты экспериментов (см. приложение 4) после аналитической обработки дали следующие зависимости стойкости круга Л12СМ1К8 100 % между правками и параметра шероховатости поверхности Ra от режимов шлифования:

$$T' = 1,1 v_{kp}^{3,04} v_u^{-0,27} t^{-1,95}, \quad Ra = 790 v_{kp}^{-1,95} v_u^{0,55} t^{0,3}.$$

Полученные результаты показывают большее влияние скорости резания на процесс шлифования эльборовыми кругами. Влияние окружной скорости изделия на стойкость эльборовых кругов значительно меньше, чем у других кругов, а глубины шлифования — больше. Поэтому преимущества использования эльборовых кругов по сравнению с другими кругами особенно ощутимы при переходе на высокие скорости шлифования.

Для расчета рациональных режимов резания по минимальным приведенным затратам на операцию целесообразно рассматривать часть затрат, зависящих только от режимов резания [16]:

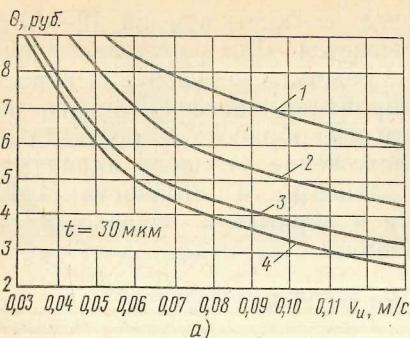
$$\theta = \frac{Q}{v_u l t} \left(Z_m + \frac{Z_u}{T} \right), \quad (7)$$

где Z_u — затраты на эксплуатацию режущего инструмента, приходящиеся на период его полной стойкости (для эльборового круга ПП 400×10×203×103 $Z_u = 339$ р.); Z_m — стоимость станко-минуты обработки на станке с учетом затрат на его эксплуатацию, ремонт, amortизацию и нормативной эффективности капиталовложений. По данным ОЗПС $Z_m = 25$ к; Q — объем металла, снимаемого с заготовки, мм^3 ; l — длина дуги, огибающей профиль в осевом сечении.

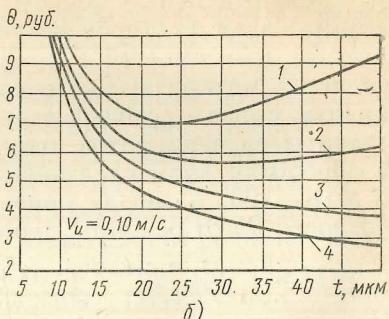
При шлифовании винта с длиной резьбовой части 1000 мм, радиусом профиля резьбы $r = 3,12$ мм, шагом 10 мм, с припуском по радиусу резьбы 0,05 мм и по диаметру 0,2 мм необходимо удалить объем металла $Q = 1600 \text{ мм}^3$; длина l дуги, огибающей профиль в осевом сечении, при этом равна 7,5 мм. Для круга Л12СМ1К8 100 % $T = 350$ ч. Подставляя приведенные данные в формулу (7), получим

$$\theta = 33 v_u^{-1} t^{-1} (25 + 18491 v_{kp}^{-3,04} v_u^{1,27} t^{1,95}).$$

Зависимости $\theta(t)$ и $\theta(v_u)$ показаны на рис. 15. При этом зависимость $\theta(v_u)$ монотонно убывает. Величина приведенных затрат может ограничивать режимы резания при $v_{kp} < 40$ м/с (рис. 15, б). В остальных случаях ограничительными факторами являются стойкость круга, шероховатость поверхности, отсутствие прижогов и т. п.



a)



б)

Рис. 15. Зависимость приведенных затрат при шлифовании резьбы ходовых винтов качения типоразмера 63×10; $L_p=1000$ мм, кругом Л12СМ1К8 100 % от окружной скорости изделия (а) и глубины шлифования (б):
1 — $v=25$ м/с; 2 — $v=30$ м/с; 3 — $v=40$ м/с; 4 — $v=50$ м/с

При определении рациональных режимов шлифования по производительности с использованием ЭВМ установлена область режимов, ограниченная условием отсутствия шлифовочных дефектов обрабатываемой поверхности; стойкостью круга $T' \geq 600$ м, $T' \geq 750$ м, параметром шероховатости шлифуемой поверхности $0,32 \leq Ra \leq 0,50$, производительностью обработки $P \geq 1,5$, определенной произведением v_u , м/с, и t , мкм (рис. 16).

Так как в результате исследований установлено, что диапазон рациональных скоростей круга уменьшился до 40—50 м/с, приведенные затраты на операцию не учитывались.

Анализ полученных графиков показывает, что максимальная производительность обработки резьбы ходовых винтов качения, обеспечивающая выполнение приведенных выше условий, достигается: для $T'=600$ м при $v_{kp}=50$ м/с, $v_u=0,14$ м/с, $t=25$ мкм; для $T'=750$ м при $v_{kp}=50$ м/с, $v_u=0,14$ м/с, $t=20$ мкм. При уменьшении скорости резания для обеспечения той же стойкости круга и минимального снижения производительности целесообразно уменьшать глубину шлифования, а не скорость вращения изделия.

При шлифовании кругами из монокорунда 44А12М28К5 для обеспечения такого же качества поверхностного слоя резьбы (стой-

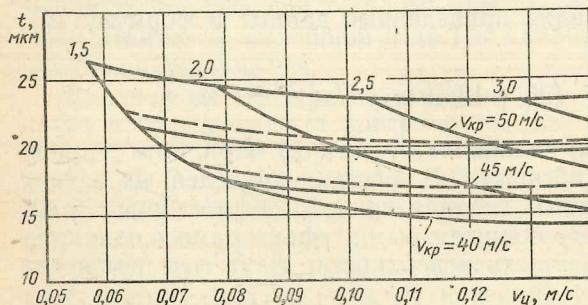


Рис. 16. Область рациональных режимов окончательного шлифования резьбы ходовых винтов качения кругом Л12СМ1К8 100 % при $T' \geq 600$ м; $0,32 \leq Ra \leq 50$; $v_u t \geq 15$; сплошная линия $T' = 600$ м; штриховая $T' = 750$ м

кость круга при этом в 10—12 раз меньше) наиболее производительными являются следующие режимы: $v_{kp}=30 \div 35$ м/с; $v_u = 0,03 \div 0,08$ м/с; $t=0,03$ мм. Таким образом, применение на операции финишного резьбошлифования эльборовых кругов позволяет увеличить производительность обработки в 1,5—2 раза.

Точность изготовления ходовых винтов качения. Из деталей узла ВГК наиболее трудоемкой в изготовлении и наиболее влияющей на эксплуатационные характеристики передачи в целом является винт. Точность винта определяет кинематическую точность винтовой пары и оказывает существенное влияние на ее долговечность, нагруженную способность, осевую жесткость, износостойкость и КПД. Точность изготовления ходовых винтов качения регламентирована ОСТ 2Р31-1—80, в котором предусмотрено пять классов точности: Н, П, В, А и С. Шероховатость поверхности для винтов классов А и С не должна превышать $Ra=0,32$ мкм. Допускаемая погрешность шага винта зависит от класса точности (табл. 8).

8. Допускаемая погрешность, мкм, шага ходовых винтов качения в зависимости от класса точности

Класс точности	Длина резьбы, мм							
	В пределах оборота	До 50	От 50 до 125	Св. 125 до 250	Св. 250 до 400	Св. 400 до 630	Св. 630 до 1000	Св. 1000 до 1600
Н	8	12	16	20	25	40	63	100
П	6	8	10	12	16	25	40	63
В	4	5	6	8	10	16	25	40
А	3	3	4	5	6	10	15	24
С	2	2	3	3	5	6	9	14

Точность изготовления ходовых винтов качения зависит от многих факторов, основные из которых приведены в табл. 9. Рассмотрим влияние этих факторов на точность изготовления и методы контроля винтов на различной стадии изготовления.

Правка резьбошлифовальных кругов. В настоящее время известны следующие методы правки резьбошлифовальных кругов: 1) накатывание металлическим роликом с обратным по отношению к кругу профилем (рис. 17, а); 2) обтачивание алмазным резцом при рабочем ходе по копиру в одну или в обе стороны (рис. 17, г); 3) обтачивание алмазным резцом при его повороте вокруг оси, совпадающей с осью профиля круга, и снятии припуска в одну или в обе стороны (рис. 17, б); 4) шлифование абразивным кругом методом обкатывания при его повороте вокруг оси, совпадающей с осью профиля шлифовального круга; 5) шлифование профиля круга по копиру алмазным роликом методом обкатывания (рис. 17, е); 6) шлифование абразивным кругом с обратным профилем методом врезания (рис. 17, в); 7) шлифование алмаз-

9. Факторы, влияющие на точность изготовления ходовых винтов качения

Точныхные параметры винта	Система СПИД			Технология финишной обработки			Качество заготовки	
	Кинематическая точность станка	Точность базирования детали	Жесткость системы СПИД	Характеристика шлифовального круга	Режимы обработки	СОЖ	Материал обрабатываемой детали	Влияние предыдущих операций
Точность радиуса профиля резьбы	+			+	+			
Колебание радиуса профиля резьбы по длине винта				+	+			
Периодическая погрешность шага	+	+	+	+	+		+	
Накопленная погрешность шага	+	+	+	+	+	+	+	
Погрешность внутреннего диаметра резьбы в пределах одного оборота	+	+	+	+	+			
Погрешность внутреннего диаметра резьбы на длине 1000 мм				+	+		+	
Радиальное биение резьбовой поверхности	+	+	+	+	+	+	+	
Шероховатость резьбовой поверхности	+	+	+	+	+	+	+	
Огранка и волнистость резьбовой поверхности				+	+			

Примечание. «+» — влияющий фактор.

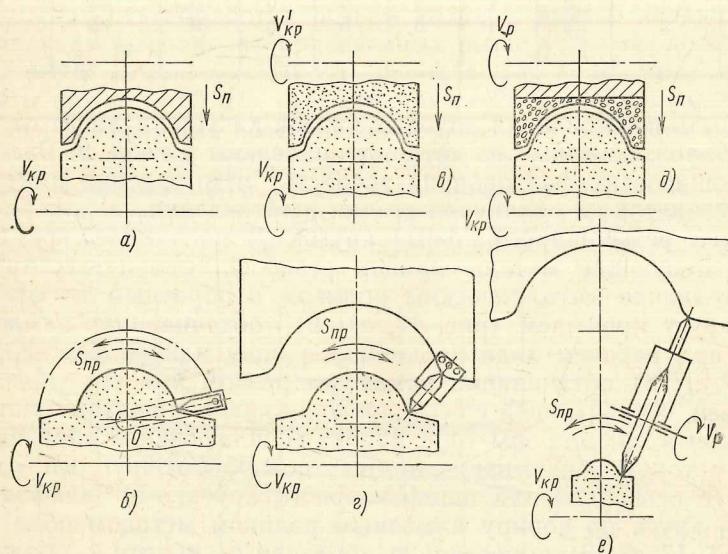


Рис. 17. Схемы правок шлифовальных кругов полукруглого профиля

ным роликом с обратным профилем методом врезания (рис. 17, *д*); 8) электрохимическая правка алмазным роликом методом обкатывания; 9) электрохимическая правка алмазным роликом с обратным профилем методом врезания; 10) накатывание металлическим роликом, шаржированным алмазной крошкой.

Из рассмотренных методов правки резьбошлифовальных кругов полукруглого профиля чаще всего применяются схемы, показанные на рис. 17, *г*, *д*.

Правку алмазным резцом по копиру применяют для обычных абразивных кругов. Режимы правки на операции окончательного шлифования резьбы ходовых винтов качения с радиусом профиля $r=3,12$ мм следующие: продольная подача резца $s_{\text{пр}}=-0,01$ мм/об; глубина резания $t_{\text{пр}}=0,01$ мм; скорость вращения круга $v_{\text{кр}}=20 \div 22$ м/с.

Преимуществом данного метода правки по сравнению с другими является высокая точность получения профиля, так как в этом случае практически отсутствует погрешность правящего инструмента.

Погрешность профиля δ_p определяется погрешностью изготовления копира δ_k и его масштабом M : $\delta_p=\delta_k/M$. При достаточно большом масштабе погрешность профиля незначительна.

Недостаток метода — невозможность использования эльборовых и алмазных кругов из-за низкой стойкости резца. Стойкость алмазного резца при правке круга Л1012М3 СМ1К8 100 % на указанных выше режимах составляет пять — семь правок.

Точность профиля круга при правке роликом определяется точностью профиля самого ролика и точностью его установки на станке. Это требует высокой точности изготовления ролика и правящего устройства.

Недостатком правки металлическим роликом является его низкая стойкость (четыре-пять правок круга 44А10-12М2-М35К8 при точности профиля 0,01 мм). Поэтому такой метод используют для получения на круге редко применяемого профиля, когда нецелесообразно использовать дорогостоящее правящее средство и специальное устройство.

Широкое распространение для правки фасонных кругов, в том числе резьбошлифовальных, в настоящее время получили алмазные ролики. Как показал опыт, их стойкость на два-три порядка выше стойкости алмазных резцов. На рис. 18 показана схема приспособления для правки круга алмазным роликом на станках «Matrix 62» и «Matrix 71» (Англия). Приспособление установлено на шпиндельной бабке станка и состоит из следующих основных деталей. Алмазный ролик 1 диаметром 70—100 мм установлен на шпинделе внутришлифовальной головки 2, закрепленной в корпусе приспособления 3. Вращение шпинделю сообщают через плоскоременную передачу 4 с передаточным отношением 1 : 1 от электродвигателя 5. Мощность электродвигателя 80 Вт, частота вращения $n=1500$ об/мин. Подачу на врезание осуществляют махо-

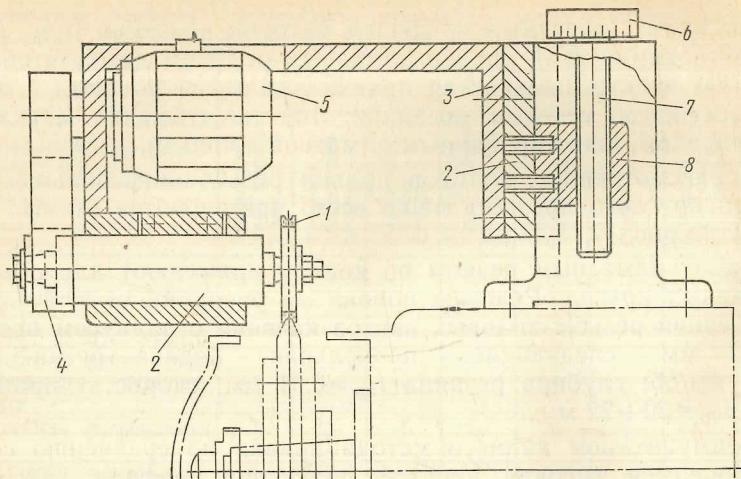


Рис. 18. Схема приспособления для правки эльборовых кругов алмазным роликом на станках «Matrix 62», «Matrix 71»

вичком 6 через винтовую пару 7—8. Глубину правки определяют по лимбу маховика 6 с ценой деления 0,01.

Перекос и осевое биение ролика относительно шлифовального круга нарушают точность воспроизведенного профиля, поэтому к изготовлению и монтажу ролика предъявляют высокие требования. Для обеспечения требуемой точности профиля резьбы отклонение от параллельности осей вращения шпинделя внутришлифовальной головки и круга должно находиться в пределах 5 мкм на длине 50 мм. Осевое биение ролика не должно превышать 2—3 мкм.

Радиальное биение ролика не искажает шлифуемый профиль, но приводит к возникновению волнистости на поверхности круга, амплитуда которой равна величине биения [1]. Это ускоряет процесс изнашивания ролика и круга, поэтому радиальное биение посадочного места шпинделя относительно оси, а также биение режущей поверхности ролика не должны превышать 2—3 мкм. Указанные требования обеспечиваются высокой точностью изготовления деталей приспособления и их сборки, а также подгонкой приспособления по месту при установке.

Известно [11], что непроизводительный расход круга при правке достигает 60—80 %, а для случая профильного шлифования и резьбошлифования этот расход еще больше. Поэтому при определении режимов правки следует определить глубину слоя, который необходимо снять для восстановления рабочей поверхности круга. В общем случае профильного шлифования высота слоя u , который необходимо снять для исправления геометрии режущей поверхности круга,

$$u = u_1 + u_2 + u_3 + u_4 + u_5,$$

где u_1 — припуск, который необходимо снять, чтобы устраниТЬ отклонение от круглости круга в торцовом сечении; u_2 — припуск, который необходимо снять, чтобы восстановить точность шлифуемого профиля в осевом сечении; u_3 — припуск, который необходимо снять для устранения волнистости режущей поверхности, возникающей в процессе затупления; u_4 — припуск, необходимый для удаления слоя круга с забитыми шламом порами; u_5 — припуск, который необходимо снять для восстановления режущей способности затупившихся зерен.

В производственных условиях были исследованы эксплуатационные характеристики круга Л12М3К8 100 % в зависимости от глубины его правки. Обработку вели на режимах: $v_{kp} = 44$ м/с; $v_u = 0,1$ м/с; $t = 0,04$ мм. Каждый опыт повторяли 10—15 раз. Результаты эксперимента показали, что с увеличением припуска на правку до 0,03 мм стойкость круга резко возрастает, а после 0,04 мм остается практически неизменной. Следовательно, для восстановления режущей способности эльборового круга при шлифовании ходовых винтов качения достаточно при правке снять слой, соответствующий суммарной величине геометрической погрешности профиля круга в торцовом сечении. При этом для круга Л12 твердостью М3 этот слой составляет 0,03—0,4 мм и уменьшается с увеличением твердости круга. Чтобы восстановить режущие свойства круга 44А 10—12 М28К5, пропитанного бакелитом, необходимо снять слой не менее 0,05 мм.

Для определения рациональных режимов правки исследовалась зависимость стойкости круга T' и параметра шероховатости Ra от скорости вращения круга во время правки v_{kp} и времени правки t для кругов Л12СМ1К8 100 % и Л10М3К8 100 %. Результаты исследований показали, что при увеличении времени правки и скорости круга микрорельеф режущей поверхности получился более заглаженным. Это затрудняет процесс саморегулирования поверхностного слоя круга во время шлифования из-за выламывания отдельных затупившихся зерен, приводит к снижению стойкости круга между правками и уменьшению шероховатости шлифуемой поверхности. При увеличении v_{kp} в 2 раза шероховатость поверхности снизилась почти в 2 раза, а стойкость между правками уменьшилась в 1,5—2 раза.

Влияние характеристики круга на качество шлифования в определенных пределах может быть учтено путем подбора режимов правки. Так, при уменьшении размера зерен в круге их число в поверхностном слое увеличивается. Одновременно уменьшается сила сцепления зерна со связкой. Так как такие зерна во время правки быстрее теряют связь с керамической связкой, то для получения достаточного развитого режущего микрорельефа круга время правки необходимо уменьшить.

Исходя из изложенного, для обеспечения параметра шероховатости поверхности $Ra = 0,32 \div 0,63$ мкм на режимах обработки $v_{kp} = 45$ м/с; $v_u = 0,1$ м/с; $t = 0,04$ мм рациональными режимами правки для круга Л12СМ1К8 100 % и правящего ролика зернистостью

400/315, концентрацией 100 % будут следующие: $v_{kp}=22,5$ м/с; $v_p=7$ м/с; $\tau=15$ с. Для круга Л10М3К8 100 % время правки необходимо уменьшить до 10—12 с. В случае автоматической правки τ уменьшается в 1,3—1,5 раза. При переходе на другие режимы шлифования характеристика рельефа круга и режимы правки меняются. Так, в рассмотренном примере при уменьшении v_p до 0,05 м/с τ может быть уменьшено до 10 с при этом же значении параметра шероховатости поверхности.

Значительное влияние на процесс шлифования оказывает режущая поверхность правящего ролика, которая зависит от концентрации алмазов. С увеличением концентрации алмазов возрастает число зерен, участвующих в формировании рабочей поверхности круга. Микрорельеф круга получается заглаженным, шероховатость шлифуемой поверхности ниже, стойкость его до затупления меньше. При испытании роликов из славутича зернистостью 400/315, концентрацией 100 и 200 % на режимах правки, указанных выше, установлено, что параметр шероховатости поверхности с повышением концентрации до 200 % снизился почти в 2 раза, а стойкость круга между правками — в 1,3—1,4 раза. Стойкость алмазных роликов определяется в первую очередь их зернистостью [4]. Для обеспечения экономически целесообразной стойкости ролика зернистость должна быть не ниже 63/80.

При правке резьбошлифовальных кругов с полукруглым профилем, изнашивающихся по вершине, большая часть припуска находится на боковые стороны профиля ролика, что приводит к увеличению износа на этих участках и радиуса профиля ролика. Для устранения этого недостатка и увеличения стойкости роликов на роликах, изготавляемых методом укладки, зерна различной величины следует укладывать по профилю.

Перспективно использование роликов с прерывистой рабочей поверхностью. Конструктивно такой ролик может быть выполнен в виде обычного ролика, где алмазоносный слой распределен в виде цилиндрических вставок на его поверхности. Изменяя конфигурацию вставок (либо прорезей) на рабочей поверхности ролика, можно изменять закон распределения площади его режущей поверхности вдоль профиля, добиваясь одинакового в радиальном направлении изнашивания во всех точках. При этом правящий профиль ролика по мере изнашивания будет смещаться в глубь алмазоносного слоя, сохраняя геометрическую точность. Стойкость ролика значительно возрастает.

Восстановление профиля изношенных алмазных роликов. Восстановление точности профиля изношенных алмазных роликов позволяет увеличить полный срок их службы в число раз, равное количеству доводочных операций. В настоящее время разработан метод алмазно-электрохимической доводки профиля алмазных роликов на модернизированном желобошлифовальном станке Л3-26П. Согласно этому методу припуски на ролике сошлифовывают алмазным кругом. С целью предотвращения засаливания круга в процессе обработки и потери им режущих свойств исполь-

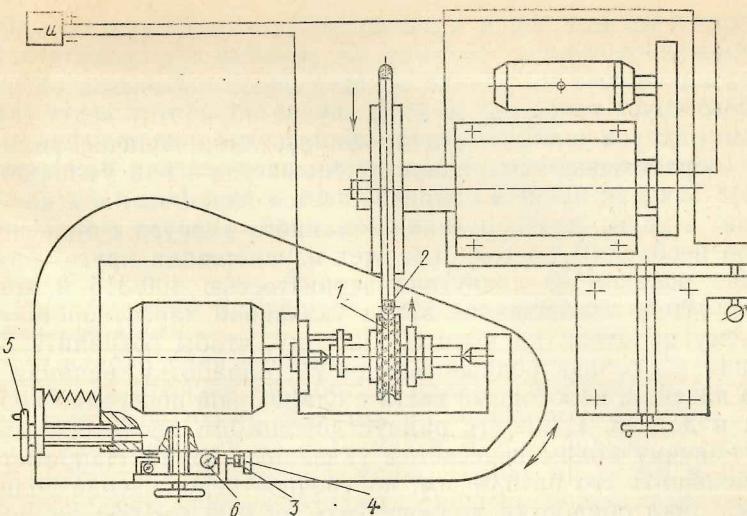


Рис. 19. Схема доводки профиля алмазных роликов на желобошлифовальном станке

зуют его затачивание электрохимическим растворением металлической основы. Для этого между кругом и роликом во время обработки создают электрический потенциал со знаком «+» на круге. Для получения полукруглой формы профиля ролик 1 совершает качательное движение вокруг оси 2 (рис. 19). Ролик устанавливают относительно оси качания с помощью набора концевых мер длины 3. Точкой отсчета служит упор 4. Перемещение ролика осуществляют винтом 5 и контролируют индикатором 6 с ценой деления 1 мкм.

Аналогично выполнено устройство контроля и ограничения перемещений для поперечной настройки бабки изделия на радиус качания. Алмазный круг в осевом направлении устанавливают с помощью съемного индикатора с ценой деления 1 мкм. Подачу шлифовального круга на изделие осуществляют механизмом поперечной подачи с микронной точностью и контролируют индикатором. Режимы доводки следующие: скорость вращения алмазного круга $v_{kp}=35$ м/с; частота вращения ролика $n_p=370$ об/мин; число двойных качаний $k=50$ дв. кач./мин, угол качания ролика $\varphi=\pm(25-30)^\circ$; рабочее напряжение $u=10\div12$ В; рабочий ток $i=50$ А. В качестве электролита используют водный раствор следующего состава: NaNO_2 — 3,25 %; NaNO_3 — 0,6 %; $\text{Na}_2\text{B}_4\text{O}_7$ — 0,5 %; Na_3PO_4 — 0,4 %; NaCO_3 — 0,25 %. Характеристика шлифовального круга А5П 350×1,5(2,5)×3(5)×127: АСВ-АСК 160/125М1 (МО4) 100 %. Поперечная подача круга или ролика 0,01 — 0,04 мм. Направление вращения ролика и круга — встречное. После окончательной доводки профиля ролика полярность на круге и детали меняется. При этом связка ролика растворяется,

обнажая алмазные зерна и повышая его режущую способность при правке.

Съем припуска на ролике осуществляют либо подачей шлифовального круга на ролик (в этом случае обработку ведут с увеличением радиуса шлифуемого профиля), либо подачей ролика на круг (обрабатываемый радиус уменьшается из-за изнашивания круга). Так как процесс сопровождается изнашиванием как ролика, так и круга, для получения заданного радиуса с большой точностью необходим постоянный учет изнашивания круга. Так, при доводке роликов из славутича зернистостью 400/315 и концентрацией 100 % изнашивание круга указанной характеристики равно съему припуска на ролике. Поэтому, чтобы сохранить радиус профиля на ролике равный исходному, обработку, начиная с момента касания, необходимо вести с одинаковой поперечной подачей круга и детали. Изменить радиус доводимого профиля на заданную величину можно пересчетом указанных подач. Например, чтобы уменьшить его на 0,01 мм, поперечное перемещение ролика за полный цикл обработки должно быть на 0,02 мм больше, чем перемещение круга.

Для наиболее точного формообразования профиля ролика, при заданном угле качения φ ширина круга b должна, максимально приближаясь к своему верхнему значению, находиться в пределах

$$2r \left| \cos \left(\varphi + \arcsin \frac{r-h}{r} \right) \right| \leq b \leq 2r \left| \sin \left(\arccos \frac{r-h}{r} + \frac{\varphi}{2} \right) \right|.$$

Если задана ширина круга, то, решая обратную задачу, устанавливают область значений φ , обеспечивающих обработку всего заданного профиля и исключающих его срезание:

$$90^\circ - \arcsin \frac{r-h}{r} - \arcsin \frac{b}{2r} \leq \varphi \leq \frac{2}{3} \left(\arccos \frac{b}{2r} + 90^\circ \right).$$

На точность профиля ролика при его доводке на желобошлифовальном станке также оказывает влияние точность совмещения осей профиля ролика и круга с осью качания. Смещение осей приводит к неравномерному распределению припуска по профилю ролика, вызывающему, неодинаковое изнашивание профиля круга. Возникающее отклонение от круглости профиля круга переносится на шлифуемый профиль ролика.

В основу способа совмещения осей качания ролика и круга положено свойство абсолютно не изнашиваемого круга вышлифовывать на заготовке при данной схеме обработки правильную окружность независимо от расположения всех трех осей, причем для заданного в поперечном направлении положения круга и заготовки совпадению этих осей должно соответствовать минимальное значение доводимого радиуса, равное радиусу профиля круга. Исходя из этого, для совмещения оси профиля круга с осью качания на заготовке из материала легко обрабатываемого алмазным кругом, диаметром, близким к диаметру ролика, формируют про-

фильную канавку. Затем круг смещают в продольном направлении относительно оси качания на величину e , фиксируемую по индикатору, и вышлифовывают еще одну канавку. Окончанию ее обработки соответствует такое же в поперечном направлении положение шлифовальной бабки стола. Полученные при этом на заготовке профили различаются между собой радиусами r_1 и r_2 и радиусом круга r_{kp} . Искомую величину смещения оси круга до совпадения с осью качания определяют из выражения

$$e_2 = [(r_1 - r_{kp})^2 - (r_2 - r_{kp})^2 - e^2]/2e,$$

где r_1 , r_2 — больший и меньший радиусы профиля на заготовке; e — смещение круга.

Выбор направления смещения круга производится по правилу: если второй, в порядке обработки, радиус профиля на заготовке меньше, круг необходимо сместить на величину e_2 в ту же сторону, что и при смещении на величину e , а если больше, круг необходимо сместить в противоположную сторону на ту же величину. Кроме того, если круг необходимо смешать в противоположную сторону, в формуле смещение e_2 получится отрицательное.

Например, для совмещения оси профиля круга указанной ранее характеристики, $r_{kp}=3,12$ мм, на заготовке (электрокорундовый круг ПП 80×20×32 Э916СМ1К8) вышлифовывались две канавки. При этом перед обработкой второй канавки круг смещали влево на величину $e=0,02$ мм. Радиусы полученных профилей: $r_1=-3,20$ мм; $r_2=3,15$ мм. Полученное расчетом $e_2=0,13$ мм. Так как величина e_2 положительная и первым обрабатывался профиль с радиусом r_1 , круг до совмещения с осью качания необходимо сместить влево на 0,13 мм.

После совмещения оси круга с осью качания можно приступать к доводке алмазных роликов, профиль которых ориентируют относительно профиля круга. Получаемые искажения ликвидируют смещением оси ролика.

Профиль многониточных роликов формируют или восстанавливают после изнашивания также доводкой на желобошлифовальном станке. Переход от витка к витку осуществляют смещением стола в продольном направлении на величину шага, установленную по набору концевых мер длины и индикатору (см. рис. 19).

Обработку радиусов переката профиля ролика, а также первоначальный контроль основного профиля производят на профилешлифовальном станке. Для этого на экране станка с помощью оптической системы в масштабе 50 : 1 высвечивается профиль ролика, установленного на оправке в центрах станка. На экране крепят кальку с нанесенным изображением требуемого профиля в том же масштабе. Путем совмещения проекции с изображением определяют точность основного радиуса.

Для обработки радиусов переката профиля используют продольную и поперечную подачи станка и шлифуют ролик до полного совмещения проекции фаски с чертежами. Применяемые алмазные круги: А5П125×1,5×3×32, АСК 160/125 МО4 100 %. Режимы об-

работки: окружная скорость круга $v_{kp}=20$ м/с; окружная скорость ролика $v_p=0,25$ м/с; глубина шлифования $t=0,01$ мм. Достигимая точность обработки: погрешность радиуса ± 3 мкм; отклонение от круглости профиля не более 2—3 мкм.

Рассмотренный метод доводки алмазных роликов оправдывает себя в массовом и серийном производстве. При мелкосерийном производстве ролики для восстановления точности профиля отправляют на завод-изготовитель.

Погрешность шага в пределах одного оборота винта. Максимальную алгебраическую разность отклонений винтовой линии от теоретической, измеренную в пределах одного оборота винта в осевом сечении, называют погрешностью шага резьбы в пределах одного оборота.

Основными факторами, влияющими на эту погрешность, являются кинематическая и геометрическая точность резьбошлифовального станка, жесткость системы СПИД, точность базирования винта, режимы резьбошлифования и точность заготовки. Были проведены подробные исследования и расчеты влияния цепи согласования вращений ходового винта станка и изделия на точность обработки по шагу. При этом была установлена степень влияния точности изготовления и сборки всех составных звеньев кинематической цепи на накопленную и периодическую погрешность шага ходовых винтов скольжения и выведены соответствующие формулы, которые справедливы и при обработке ходовых винтов качения.

Проведенный расчет по этим формулам и проверка специальными приборами показывают, что влияние отдельных звеньев кинематической цепи согласования на погрешность шага в пределах оборота винта качения различно. Установлено, что основное влияние оказывают осевые биения ходового винта станка и шпинделя изделия. Влияние остальных составляющих погрешностей кинематической цепи станка, в том числе и зубчатых колес гитары, в сумме не превышает 10—15 %. При увеличении шага обрабатываемого винта эта погрешность увеличивается. По результатам измерений погрешность шага в пределах оборота при обработке на станке «Matrix» составила 3, 5 и 7 мкм соответственно для винтов шагом 5, 10 и 20 мм.

Для уменьшения погрешности шага, обусловленной кинематикой станка, в кинематической цепи устанавливают зубчатые колеса — компенсаторы с регулируемым эксцентрикситетом зубчатых венцов. На МЗКРС разработан способ регулирования компенсаторов в цепи резьбошлифовального станка, обеспечивающий коррекцию циклических погрешностей с точностью 0,2—0,3 мкм. Для регулирования по разностной функции определяют как величину необходимого эксцентрикса колеса, так и его фазу. Этот метод реализован в специальных резьбошлифовальных станках 5Д822ВС1.

Следующим фактором, влияющим на погрешность шага в пределах оборота, является погрешность установки и закрепления винта на станке. В настоящее время известны следующие методы

базирования ходовых винтов при резьбошлифовании: по шейкам при закреплении винта в патроне и люнетах и по центральным отверстиям. При изготовлении ходовых винтов качения чаще применяют последний метод базирования. При этом к базирующим поверхностям прецизионных резьбошлифовальных станков предъявляют высокие требования. Для уменьшения биения передний центр шлифуют непосредственно на станке с помощью специального приспособления. Допуск на отклонение от круглости упорных центров на прецизионных резьбошлифовальных станках составляет 1—2 мкм; на угол конуса — 20'; на разновысотность переднего и заднего центра — 0,02 мм.

Допуск на базовые поверхности детали (центральные отверстия) устанавливают исходя из степени переноса погрешности центральных отверстий на шлифуемую резьбу. Для ходовых винтов качения этот допуск принят равным 4 мкм для всех классов точности. Установить степень переноса отклонения от круглости центральных отверстий ходовых винтов на резьбовую поверхность очень трудно в связи со сложностью их измерения. Существующий метод проверки «на краску» дает в производственных условиях только качественную оценку точности обработки. При проверке «на краску» поверхность прилегания к контрольному центру шлифованных центральных отверстий диаметром 16 мм, по сравнению с такими же, доведенными на токарном станке твердосплавными центрами, увеличилась в 2—2,5 раза. Центры шлифовали на центрошлифовальном станке МВ-119. При последующей обработке резьбы на станке «Matrix» погрешность шага в пределах оборота на винтах со шлифованными центрами составила 3—5 мкм по сравнению с погрешностью 6—8 мкм — на винтах с притертными центрами. Следовательно, при обработке винтов класса В и точнее обязательным является шлифование их центральных отверстий. При этом чтобы уменьшить влияние осевого и радиального биения шпинделя на резьбовую поверхность, короткие винты, как правило, обрабатывают на станках с невращающимися центрами. Длинные винты, у которых положение оси кроме центров определяется люнетами и биение шпинделя на точность резьбы оказывается меньше, обрабатывают на станках с вращающимися центрами.

Рассмотрим влияние режимов шлифования на погрешность шага в пределах оборота. При неподвижных, точно выполненных центрах станка и абсолютной жесткости стыка центровое отверстие — центр станка все точки винта описывают правильные окружности независимо от геометрии его центральных отверстий. В действительности под воздействием сил резания и массы винта отклонения от круглости и угла конуса центральных отверстий из-за упругих отжатий стыка увеличивают погрешность резьбы. Поэтому для уменьшения погрешности резьбы в пределах оборота необходимо снижать режимы шлифования и повышать качество обработки центральных отверстий.

Чем меньше поверхность центральных отверстий, тем легче добиться при их обработке требуемой точности. Поэтому центровые

отверстия для базирования винта выполняют возможно меньших диаметра и ширины. Эти размеры зависят от массы винта и регламентируются стандартом предприятия.

Повышение режимов шлифования увеличивает также упругую деформацию круга в зоне резания и, таким образом, степень переноса погрешности заготовок. Поэтому даже при точных центровых отверстиях резьбу винтов высоких классов точности шлифуют на низких режимах. Для снижения степени переноса погрешности заготовки без уменьшения производительности обработки рекомендуется увеличивать число рабочих ходов круга с одновременным увеличением скорости вращения изделия. При этом точность заготовки должна быть ниже точности изделия не более чем на класс.

Следующим фактором, влияющим на погрешность резьбы, является радиальное биение заготовки. Погрешность шага в пределах оборота зависит от биения винта e и определяется

$$\Delta p = \frac{2ep}{\pi D}, \quad (8)$$

где D — диаметр винта.

Например, если обрабатывается винт типоразмером 63×10 мм с биением $0,2$ мм, то определенная по формуле (8) погрешность шага этого винта составит 10 мкм.

Для уменьшения погрешности шага винта качения, зависящей от биения заготовки, применяют трехточечные люнеты, исправляющие положение оси винта и повышающие жесткость установки винта на станке. Число люнетов определяют в зависимости от жесткости конкретной детали. Для винтов с отношением $15 \leq L/d \leq 20$ применяют, как правило, один люнет; при $20 \leq L/d \leq 25$ — два люнета; при $L/d > 25$ — три.

Винт в люнетах устанавливают с помощью индикатора с микронной точностью. Поэтому люнеты, при достаточном их числе, позволяют практически ликвидировать погрешность формы попечного сечения и шага винта от его нежесткости и в значительной степени снизить погрешность от коробления.

Недостаточная жесткость винта способствует также возникновению вибраций системы СПИД, что отрицательно сказывается на параметрах шероховатости и волнистости поверхности резьбы.

Волнистость на поверхности резьбы ходовых винтов качения не регламентируется, но при обработке винтов высоких классов точности она может составлять до $2/3$ допуска на погрешность шага в пределах оборота. Поэтому предъявляют высокие требования к жесткости системы СПИД и дисбалансу вращающихся масс резьбошлифовальных станков. Известно, что одним из основных источников вибрации является шлифовальный круг. Влияние этого источника возрастает при шлифовании кругами из эльбора, которые выполнены в виде эльбороносного кольца шириной $10-13$ мм, укрепленного на керамическом диске. Так как эльбороносный слой имеет отличную от основной массы круга плотность, отклонения от концентричности эльбороносного слоя создают дополнитель-

ную неуравновешенность. Чтобы устраниТЬ ее отрицательное влияние, требуется более точное выполнение геометрических параметров указанных кругов при изготовлении, тщательная балансировка в процессе эксплуатации, а также повышенная жесткость оборудования, на котором производится обработка. Кроме того, правку алмазными резцами при обходе профиля круга необходимо заменить на правку фасонными роликами одновременно всего режущего профиля. Это способствует лучшему устранению дисбаланса круга.

Для точных ходовых винтов (класса А и С) погрешность шага не должна превышать $2-3$ мкм, и для ее устранения обычных технологических мер недостаточно. В этих случаях необходимо применять системы автоматического управления (САУ) точностью шага обрабатываемых ходов винтов. Такая САУ разработана в Московском станкоинструментальном институте. С помощью этой системы повышение точности шага обрабатываемого винта осуществляют стабилизацией отношения угла поворота шпинделя изделия $\Delta\varphi$ и продольного перемещения стола станка ΔP за счет дополнительного поворота шпинделя изделия.

В работе [11] предлагается еще несколько систем, позволяющих компенсировать погрешность шага ходовых винтов. Однако все эти системы громоздки в исполнении, дорогостоящи, не всегда надежны в эксплуатации и поэтому не нашли применения в отечественном станкостроении.

Накопленная погрешность шага резьбы. Основными источниками накопленной погрешности шага ходовых винтов качения, возникающей при обработке, являются следующие: кинематическая и геометрическая погрешность резьбошлифовального станка, температурная деформация станка, упругие деформации системы СПИД, погрешность установки заготовки, температурные деформации заготовки.

Исследованиями, проведенными на МЗКРС, установлено, что накопленная погрешность шага на длине резьбы до 100 мм определяется погрешностью кинематической цепи резьбошлифовального станка. На большей длине увеличивается влияние температурных деформаций. Кинематические и геометрические погрешности станка, определяемые накопленной погрешностью шага ходового винта станка и погрешностью отклонения от прямолинейности перемещения и перекоса стола станка, являются постоянными и устраняются с помощью механизмов компенсации, систем ЧПУ или САУ.

Температурные деформации станка влияют на накопленную погрешность шага резьбы в результате относительного смещения шлифовального круга и заготовки за время одного рабочего хода шлифования и изменения кинематической точности станка. Относительные температурные деформации зависят от выделения тепла в подшипниках шпинделей шлифовального круга и изделия и вызывают появление накопленной погрешности шага не более

3 мкм на длине 1,4 м (по данным МЗКРС). Погрешность уменьшается в 3 раза через 4 ч работы. Погрешность шага от изменения кинематической точности станка определяется температурной деформацией ходового винта, зависящей от тепловыделений в системе охлаждения и в паре винт — гайка, и достигает 50—60 мкм на длине 1,4 м (согласно тем же исследованиям). Для уменьшения тепловыделений в системе охлаждения рекомендуется применять термостабилизацию СОЖ. При стабилизации температуры СОЖ $20 \pm 0,5^{\circ}\text{C}$ накопления погрешность шага от температурных деформаций ходового винта станка уменьшилась в 5—6 раз и определялась только тепловыделением в паре ходовой винт — гайка. Полностью стабилизация температурных деформаций станка происходит через 12 ч после начала работы, т. е. обработка ведется практически при нестационарном температурном режиме станка. Это необходимо учитывать при обработке ходовых винтов классов точности А и С.

Накопленная погрешность шага, вызываемая температурными деформациями заготовки во время обработки, зависит от большого числа факторов. К основным из них относятся: режимы резания, физико-химические и теплофизические свойства материала, размеры заготовки, температура окружающей среды и заготовки, температура СОЖ, ее расход, состав и метод подачи, режущие свойства применяемого инструмента, причем возникающая от действия каждого фактора накопленная погрешность шага состоит из систематической и случайной составляющих.

Определить систематическую накопленную погрешность шага от номинальных значений действующих факторов можно расчетом или экспериментально, причем последний путь связан с большим числом измерений. Кроме того, эксперименты надо повторять при изменении значений любого из факторов, а методы определения накопленной погрешности шага в настоящее время достаточно трудоемки. В единичном производстве такой метод определения систематической составляющей накопленной погрешности шага вообще неприемлем.

Известно, что при изготовлении винтов накопленная погрешность шага ходовых винтов зависит от разности температур заготовки и ходового винта станка. Поэтому, чтобы принять температуру ходового винта станка, заготовки перед обработкой должны выдерживаться на рабочем месте не менее 6—8 ч. Так как температурные деформации остальных узлов станка также оказывают влияние на точность, обработку ходовых винтов высоких классов точности необходимо вести в термоконстантном помещении (в условиях сборки и отладки станка).

СОЖ, кроме высокого смазывающего, охлаждающего и вымывающего действия, должна обеспечить постоянство теплоотвода из зоны резания. Поэтому к применяемым для резьбошлифования точных ходовых винтов смазывающе-охлаждающим жидкостям предъявляют высокие требования по сохранению теплофизических свойств. Для поддержания постоянства температуры СОЖ на про-

тяжении всего периода работы станка применяют специальные холодильные установки. Наибольшее распространение в настоящее время при шлифовании резьбы винтов классов точности Н, П и В в качестве СОЖ получило масло индустриальное И-12. Из производственного опыта его применения срок годности, определенный по периоду сохранения теплофизических свойств, составляет 3,5—4 недели при двухсменной работе. Для ходовых винтов классов точности А и С срок годности необходимо уменьшать или использовать более дорогие СОЖ.

Режущие свойства резьбошлифовального круга в значительной мере определяют мощность шлифования и количество теплоты, выделяющейся в зоне резания. Сохранение режущих свойств круга во времени обеспечивает стабильность температурной деформации детали.

Изменение режимов обработки вызывает, во-первых, колебание мощности тепловыделения в зоне резания, во-вторых — изменение времени действия теплового источника.

Влияние указанных факторов на накопленную погрешность шага ходовых винтов можно рассматривать как результат действия температурного источника мощностью N , время действия которого определяется скоростью вращения изделия и длиной дуги контакта круга с заготовкой. В современных резьбошлифовальных станках с помощью холодильной установки температура СОЖ в момент попадания ее на винт может быть отрегулирована в зависимости от режимов обработки таким образом, чтобы у винта от прохода к проходу восстанавливалась первоначальная температура. Кроме того, обработка многониточными кругами позволяет выполнить операцию за один проход. В связи с этим рассмотрим процесс однопроходного шлифования резьбы ходовых винтов качения.

Для определения температурной деформации процесс резьбошлифования рассматриваем как результат нагрева сплошного цилиндра, на наружной поверхности которого на расстоянии шага друг от друга движутся по винтовой линии плоские тепловые источники, число которых равно числу витков на многониточном круге.

Так как при шлифовании на диспергирование стружки расходуется не более 10 % затраченной мощности, то в качестве мощности теплового источника с достаточной точностью можно принять мощность шлифования. Шлифование резьбы ходовых винтов сопровождается медленным (по сравнению с другими видами шлифования) перемещением детали относительно шлифовального круга и соответственно относительно падающей струи СОЖ. Температура охлаждаемой поверхности за время нахождения детали в зоне действия СОЖ колеблется от $600\text{--}900^{\circ}\text{C}$ до температуры окружающей среды. Коэффициент теплообмена с масляной средой, как известно, в значительной мере определяется разностью температур поверхности детали и масла и в зависимости от этой разности его значение может меняться в 4—5 раз. Это при выборе

значения коэффициента теплообмена может внести значительную погрешность в результат расчета. Так как средняя температура для данного материала является мерой сообщаемой ему тепловой энергии, то важно правильно учесть количество этой энергии, попадающее в шлифуемый винт, не рассматривая процесс ее передачи в окружающую среду, т. е. для расчета температурной деформации достаточно значение мощности шлифования скорректировать на величину всех утечек тепла, а коэффициент теплообмена приравнять нулю.

Согласно исследованиям [9], при шлифовании с охлаждением в круг и воздух уходит не более 5—8 % выделившегося в зоне резания тепла. Чтобы определить количество тепла Q , поступающего в СОЖ и стружку, удобно воспользоваться методом калориметрирования. Для этого необходимо знать температуры падающей на винт струи жидкости и стекающей с него струи, а также расход жидкости из сопла:

$$Q = c\gamma v \Delta T,$$

где c — удельная теплоемкость жидкости; γ — плотность вещества СОЖ; v — расход жидкости; ΔT — разница температур в стекающей и падающей на винт струях.

Формула для определения удлинения винта получена интегрированием частного решения дифференциального уравнения теплопроводности, полученного Ю. А. Напарыниным для температурного поля точечного источника, двигающегося по указанной схеме.

$$\Delta L_p = \frac{\alpha k k_1}{2\pi \lambda h_0} \sum_{i=0}^n N_i \sum_{m=1}^{\infty} \frac{1}{J_0^2(s_m)} \int_0^1 I_0(s_m \rho) d\rho \times \\ \times \left[\frac{2h}{s_m^2} + \frac{e^{\gamma_m(b+h)} - e^{-\gamma_m(h-b)}}{\gamma_m^2(X_m - \gamma_m)} \right];$$

где α — коэффициент температурного расширения материала винта; k — коэффициент, учитывающий процент тепла, идущего на нагрев детали; k_1 — коэффициент, учитывающий влияние характеристики шлифовального круга (k_1 определяется экспериментальным методом как отношение мощности шлифования данным кругом к мощности шлифования кругом Л12СМ1К8 100 %, для которого $N = v_{kp}^{-3,04} v_n^{0,48} t^{0,45}$); h_0 — половина ширины канавки шлифуемой резьбы; λ — коэффициент теплопроводности материала винта; I_0 — функция Бесселя первого рода нулевого порядка; числа s_m для суммирования по m определяются как положительные корни уравнения $sI_1(s) = 0$, где I_1 — функция Бесселя первого рода первого порядка; $h = h_0/R$; $\rho = r/R$; $b = H_0/R$ (R — радиус винта; H_0 — шаг резьбы; i — порядковый номер витка, считая от последнего резьбоформирующего) (см. приложения 5);

$$X_m = \frac{1}{2} (u + \sqrt{u^2 + 4s_m^2}); \quad \gamma_m = \frac{1}{2} (u - \sqrt{u^2 + 4s_m^2});$$

u — безразмерная скорость источника; $u = (vR)/a$.

Для определения температурной деформации ходовых винтов при многопроходном шлифовании резьбы удобно воспользоваться методикой, разработанной на МЗКРС, согласно которой накопленная погрешность шага резьбы на длине l , возникающая из-за температурных деформаций заготовки Δp^l , равна температурному удлинению этого участка перед его обработкой, взятому с отрицательным знаком:

$$\Delta p_i^l = \alpha T_{i-1} \frac{v}{\beta} B^{\left(k - \frac{n+1}{n}\right)} (B - 1),$$

где T_{i-1} — максимальная температура заготовки на $i - 1$ проходе;

v — линейная скорость стола; $B = e^{\frac{\beta_i}{\alpha}}$; $k = l/L_p$; n — отношение скоростей стола при холостом и рабочем ходах; T_{i-1} и β определяются из соотношений

$$T = \sqrt{\left(\frac{\beta}{2}\right)^2 + \mu^2}; \quad \beta = v/a; \\ \mu = \sqrt{(2h)/R}; \quad h = a/R,$$

здесь a — температуропроводность заготовки; R — радиус заготовки; v — линейная скорость источника тепла.

Систематическую накопленную погрешность шага, возникающую при номинальном значении действующих факторов, компенсируют механизмом коррекции на станке. Случайные отклонения нормируемых величин от номинального значения (колебание режимов резания, неоднородность физико-механических и теплофизических свойств материала винтов, колебание температуры СОЖ, окружающей среды и заготовок, непостоянство режущих свойств инструмента) составляют погрешность обработки ходового винта на данной операции, причем с увеличением объема снимаемого по резьбе металла случайные отклонения действующих факторов увеличивают нагрев заготовки. Так как объем снимаемого металла уменьшается от черновой к чистовой операции, то точность обработки возрастает в том же направлении, даже если все операции выполнены на одном станке.

По результатам измерений накопленной погрешности шага винтов на всех операциях резьбошлифования установлено, что закону нормального распределения подчиняются только погрешности на операции обдирочного шлифования резьбы по сплошной заготовке. На всех последующих операциях резьбоформирования распределение накопленной погрешности шага асимметрично и смешено в сторону отрицательных значений. Станок на последующей, после черновой, операции настраивают таким образом, чтобы после шлифования накопленная погрешность шага отсутствовала. После шлифования заготовок с увеличенным и уменьшенным ша-

гом получали винты только с уменьшенным шагом. Установленная закономерность объясняется увеличением количества теплоты, поступающей в деталь, при увеличении накопленной погрешности шага резьбы заготовок как в сторону растяжения, так и в сторону сжатия. Повышение температурной деформации заготовки обусловлено неравномерностью распределения припуска по профилю обрабатываемой резьбы.

Наибольшая погрешность шага на данной операции

$$\Delta = \frac{1}{2} \Delta_0 + \Delta_n + \Delta_h,$$

где Δ_n — погрешность, передаваемая с предыдущей операции; Δ_h — погрешность настройки; Δ_0 — собственная погрешность операции.

Для снижения влияния накопленной погрешности шага на предыдущей операции необходимо увеличить шаг обрабатываемого винта на величину $\Delta_n/2$. Тогда погрешность обработки

$$\Delta = \frac{1}{2}(\Delta_0 + \Delta_n) + \Delta_h. \quad (9)$$

Степень переноса погрешности с предыдущей операции на последующую зависит от качества режущего инструмента и режимов резания и определяется коэффициентом технологической наследственности ε :

$$\Delta_n = \varepsilon \delta', \quad (10)$$

где δ' — рассеяние продольных деформаций винтов на предыдущей операции.

Значение коэффициента технологической наследственности для определенного технологического процесса используется для расчета коррекции шага при настройке станка на обработку. Его определяют по стандартной методике.

Зная коэффициент переноса погрешности по операциям, можно, задаваясь необходимой точностью на данной операции при известной погрешности шага заготовок, определить требуемые режимы шлифования либо при установленных режимах обработки назначить допуск на точность по шагу на предыдущей операции. Так, из формулы (9) найдем

$$\Delta_n = 2\Delta - 2\Delta_h - \Delta_0.$$

Подставляя вместо Δ_n его значение из формулы (10), получим

$$\delta' = [2(\Delta - \Delta_h) - \Delta_0]/\varepsilon.$$

Определенные по известному коэффициенту ε режимы шлифования при большом значении накопленной погрешности шага заготовок могут быть в значительной степени заниженными, что увеличивает трудоемкость операции. В этом случае процесс снятия припуска до полного формирования резьбовой поверхности раз-

деляют на две или большее число операций. Целесообразность этого определяется экономическим расчетом.

На МЗКРС для компенсации накопленной погрешности шага от температурных деформаций заготовки и ходового винта разработана схема адаптивного управления. Она содержит два преобразователя, измеряющих смещение пиноли задней бабки и правого конца ходового винта относительно стола резьбошлифовального станка. Так как температурное удлинение заготовки приводит к отрицательной накопленной погрешности шага, а ходового винта — к положительной, то разность показаний двух преобразователей покажет погрешность шага от действия двух этих факторов. Разностный сигнал используют для разворота коррекционной линейки на каждом из проходов резьбошлифования. Проверка этой системы на станке МВ150 позволила уменьшить накопленную погрешность шага в 5 раз.

Шероховатость поверхности ходовых винтов качения. Наружная цилиндрическая поверхность ходового винта служит дополнительной базой на операции шлифования и измерения резьбы, и требования по точности ее обработки довольно жесткие: конусность на всей длине резьбовой части не более 6 мкм, овальность в пределах 4 мкм, параметр шероховатости не должен превышать $R_a = 1,25$ мкм. Указанные точности и параметры шероховатости достигают шлифованием наружного диаметра винта на круглошлифовальных станках кругами характеристик 13А—15А40СМ1—СМ27К5.

Шероховатость резьбовой поверхности ходовых винтов качения оказывает значительное влияние на такие эксплуатационные характеристики передачи, как долговечность, нагружочная способность, КПД, осевая жесткость. Для винтов классов точности А и С погрешность шага не должна превышать 2—3 мкм. Шероховатость резьбовой поверхности винтов и волнистость оказывают заметное влияние на точность шага. Поэтому для этих винтов параметр шероховатости поверхности не должен превышать 0,32 мкм, а для винтов остальных классов точности — 0,63 мкм.

Экономически целесообразные пути достижения шероховатости поверхности полукруглой резьбы ходовых винтов в пределах $R_a = 0,63$ мкм рассмотрены выше.

Для получения шероховатости резьбовой поверхности винтов качения не ниже $R_a = 0,32$ мкм применяют разработанный в Одесском политехническом институте метод профильной микродоводки. Осуществляется профильная микродоводка резьбы винтов с помощью специального приспособления, обеспечивающего требуемую траекторию движения зерен абразивного бруска. Приспособление устанавливают на резьбошлифовальном или токарно-винторезном станке. Обработка производится брусками А63М28Т1 на глифталевой связке, А63М20С2 и А63М14С2 — на керамической связке.

Режимы микродоводки: амплитуда возвратно-поступательных движений бруска — $2,3 \pm 0,2$ мм; угол качания брусков — $0,2 \pm 0,3$ рад.; угол сдвига фаз между возвратно-поступательным и ка-

чательным движениями бруска — $1,57 \pm 0,3$ рад.; сила прижима бруска к обрабатываемой поверхности — 80 Н; частота возвратно-поступательных и качательных движений брусков — $14,5 \text{ c}^{-1}$; число циклов профильной микродоводки — 8.

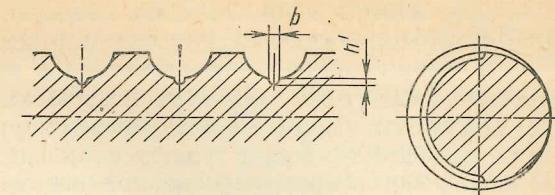
Исследованиями Н. Т. Хайлловского установлено, что профильная микродоводка кроме снижения высоты микронеровностей создает более благоприятный, с точки зрения работы винта в собранном механизме, характер микрорельефа; устраняет образующийся в процессе резьбошлифования слой с пониженными физико-механическими свойствами; в 1,5—2 раза уменьшает волнистость и погрешность радиуса профиля резьбы. Наиболее интенсивно в процессе микродоводки устраняются погрешности с шагом до 25—30 мм. Конусность, волнистость с большим шагом, наклонные и периодические погрешности шага винта профильной микродоводкой не устраняются, поэтому точность данных геометрических параметров обеспечивают предшествующими операциями резьбошлифования.

Сравнительные испытания износостойчивости рабочих участков профиля резьбы винтов, обработанных абразивными брусками и шлифованных, проведенные на передачах ВГК со средним диаметром $d_0 = 80$ мм и шагом $P = 10$ мм при натяге 77 мкм показали, что доведенная резьба винта в 1,4—1,5 раза более износостойка по сравнению со шлифованной при равных условиях нагружения.

Коробление ходовых винтов качения и методы его устранения. В результате механической и термической обработки в винтах возникают остаточные напряжения, перераспределение которых вызывает деформацию заготовки. При изготовлении ходовых винтов качения возникновение поперечной деформации повышает трудоемкость обработки, приводит к браку, иногда неисправимому. Как известно, остаточные напряжения на данной операции включают напряжения, возникающие на всех предыдущих операциях, и зависят от качества заготовки, что не позволяет предупредить возникновение коробления винтов технологическими методами. Конструктивно для предупреждения коробления предусмотрена разгрузочная канавка по дну резьбы, которая выполняется после операции термического упрочнения. Выполнение этой канавки увеличивает трудоемкость изготовления винта и не ликвидирует полностью опасности его искривления.

Рихтовка винтов под прессом имеет следующие недостатки: деталь находится в состоянии неустойчивого равновесия; нагрев, сотрясение и вылеживание на складе могут повлечь за собой возвращение винта в первоначальное состояние; для ликвидации упругого последействия (медленного возвращения детали в исходное положение) применяют низкотемпературный отпуск при 180°C в течение 16—18 ч, что удлиняет цикл изготовления винта, ухудшает внешний вид, качество поверхности и делает этот метод практически непригодным для окончательно обработанных винтов. Между тем основная часть винтов коробится именно на операции чистового

Рис. 20. Схема одностороннего прорезания разгрузочной канавки в дне резьбы ходовых винтов качения с целью их правки



шлифования резьбы. Третьим недостатком метода является невозможность правки шеек.

Для устранения поперечной деформации винта рекомендуется способ, основанный на использовании поверхностных остаточных напряжений. Принципиальное отличие этого способа от силовой правки заключается в том, что если при силовой правке в детали обязательно возникает пластическая деформация металла, то здесь происходит перераспределение остаточных напряжений в упругой области без наличия пластических деформаций. Рекомендуемый способ не имеет недостатков, рассмотренных выше, и может использоваться для правки окончательно обработанных винтов без последующей их термической обработки.

Сущность способа заключается в одностороннем удалении слоя металла с нерабочих поверхностей дна резьбовых впадин (рис. 20). При этом, чтобы выпрямить винт, необходимо (рис. 21): при наличии в поверхностном слое сжимающих напряжений удалить металл со стороны выпуклости; при наличии в поверхностном слое растягивающих напряжений удалить металл со стороны вогнутости (см. приложение 7).

Металл удаляют до полного выпрямления винта. Если стрела прогиба винта по длине на разных участках направлена в разные стороны, металл удаляют по участкам то с одной стороны винта, то с другой, в соответствии с направлением прогиба. Для определения характера напряжений снимают металл по указанному способу на небольшом участке винта (10—15 витков). При этом, если металл снят со стороны выпуклости и кривизна винта увеличилась, то в поверхностном слое имеют место напряжения растяжения, а если кривизна винта уменьшилась, то в поверхностном слое имеют место напряжения сжатия. При снятии металла со стороны вогнутости наблюдается обратная картина.

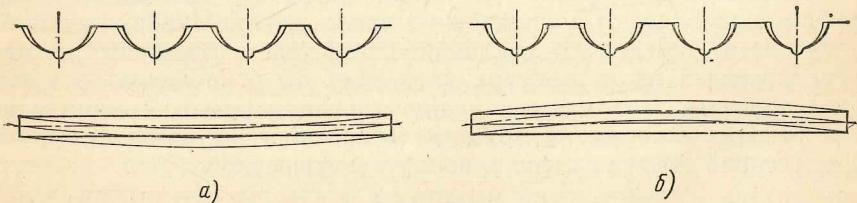


Рис. 21. Схема правки изогнутых винтов односторонним прорезанием канавки в дне резьбы при наличии в поверхностном слое напряжений растяжения (а) и напряжений сжатия (б)

Правку винтов этим способом производят на обычных резьбообрабатывающих станках при помощи механизма затылования и шлифовального круга, заправленного по размеру допускаемой канавки на внутреннем диаметре резьбы качения. Винт устанавливают в центрах станка. После определения величины биения и характера напряжений приступают к правке. Если за один рабочий ход круга винт выровнялся не полностью, операцию повторяют столько раз, сколько требует полная ликвидация биения.

Этот способ позволяет устранить любое коробление на всех винтах. Проверка исправленного таким образом винта показала, что накопленная и циклическая погрешность шага при этом практически не изменяются. Испытания под нагрузкой на стенде показали, что износостойкость винтов по сравнению с нерихтованными винтами не изменилась, а коробление по мере изнашивания не увеличилось. Вылаживание таких винтов в течение двух лет также не вызвало заметного изменения этих параметров.

Контроль точности изготовления ходовых винтов качения. Точность обработки ходовых винтов качения контролируется на всех этапах изготовления с помощью универсальных измерительных средств: штангенциркуля, гладких и резьбовых калибров, гладкого микрометра и т. п.

Трудности представляет контроль точностных параметров специальной резьбы. Измерение внутреннего диаметра, конусности и цилиндричности методом трех проволочек является несовершенным и трудоемким. Для устранения этих недостатков Особым конструкторским бюро средств автоматизации (ОКБ СА) спроектированы и изготовлены специальные резьбовые микрометры с индикаторной головкой с ценой деления 1—2 мкм.

На операции предварительного формирования резьбовой поверхности, где допуск на радиус профиля большой, его контролируют специальными шаблонами. Так как радиус профиля по мере изнашивания круга увеличивается, то круг правят после того, как радиусная часть шаблона проходит в резьбовую канавку. На чистовой операции шлифования резьбы ходовых винтов качения точность радиуса профиля резьбы определяют по профилю круга. Для этого шлифуют шаблон, установленный в специальном приспособлении. Профиль на шаблоне контролируют на микроскопе УИМ-21 с помощью специальной оптической головки ОГР-23 с нанесенными контурами требуемых профилей. Контролируемый профиль располагают концентрично нанесенному. Измеряя величину просвета, определяют отклонение радиуса от заданного, а наличие просвета вдоль контура указывает на отклонение от круглости профиля. Более точно радиус профиля резьбы можно контролировать, измеряя на том же микроскопе величину хорд на определенной высоте профиля, пользуясь формулой

$$r = \frac{c^2}{8h} + \frac{h}{2},$$

где c — длина хорды; h — высота, на которой измеряется хорда.

В ОПИ разработан измерительный комплекс для контроля и регистрации непостоянства внутреннего диаметра резьбы винтов, радиуса профиля резьбы винтов и гаек с погрешностью, не превышающей 0,1 мкм. Конструкция устройств предусматривает измерение диаметральных размеров резьбы по двухконтактной схеме, что повышает точность измерения. Измерения проводят с использованием малогабаритных и сверхминиатюрных сдвоенных диодных механотронов 6МХЭС и 6МХ8Б. Информация о контролируемом параметре поступает непрерывно. Форма представления информации: отсчет по шкальному показывающему прибору; отсчет в двоичной системе по светодиодам на лицевой панели аналого-цифрового преобразователя Ф4222; регистрация на диаграммной ленте с помощью самопищущих приборов типа Н373-1; регистрация на пяти- или восьмидорожечной перфоленте с помощью перфорирующих устройств ПЛ-150, ПЛ-80, ПЛ-150П.

Суммарная погрешность измерения параметров резьбы не превышает 0,1—0,2 мкм и отвечает требованиям СТ СЭВ 303—76 о соотношении допусков на контролируемые параметры и погрешности измерения.

Шаг винтов качения контролируют в процессе обработки и после полного изготовления. Для контроля накопленной погрешности шага винта непосредственно на станке после обработки резьбы на шлифовальную бабку устанавливают индикаторную стойку таким образом, чтобы наконечник индикатора с ценой деления 0,001 мм либо другого точного прибора касался боковой поверхности профиля резьбы. Затем, вращая обработанный винт, перемещают шлифовальную бабку вместе с индикаторным прибором и измеряют накопленную погрешность шага винта-изделия и ходового винта станка как наибольшее отклонение показаний индикатора. Вместо показывающего прибора можно использовать самопищий с индуктивными преобразователями типа БВ-662. Для определения периодической погрешности шага винт поворачивают в центрах на 180° и повторяют запись винтовой линии. Разность показаний в одних и тех же сечениях равна удвоенной величине периодической погрешности шага винта.

Контроль накопленной и периодической погрешностей шага винтов качения после предварительной обработки осуществляют выборочно с помощью специальных накладных шагомеров конструкции ОКБ СА.

На рис. 22 показана схема шагомера с базированием по внутреннему диаметру винта. На штанге 1 закреплены хомутик с жестким наконечником 2, два кронштейна 3 с двумя каретками 4 установочного перемещения, на которых закреплены два индикатора 5 и 7, двухлечие рычаги 6, имеющие возможность поворота относительно оси, жестко связанной с корпусом головки. На одном конце двухлечего рычага 6 размещен наконечник 8, контактирующий при измерении с двумя сторонами профиля резьбы. Перемещение второго плеча рычага фиксируют индикатором 7.

Измерительные наконечники 8 вместе с индикатором 5 уста-

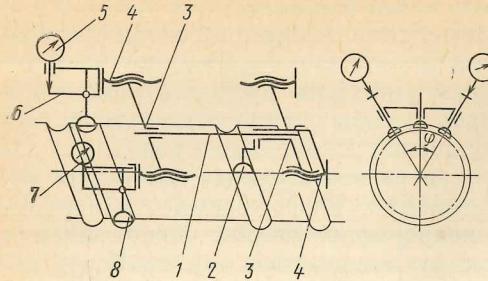


Рис. 22 Схема накладного шагомера для ходовых винтов качения

навливают под углом ϕ , зависящим от выбранного шага при измерении периодической погрешности резьбовой поверхности, который обеспечивается поворотом и фиксацией кареток 4. После установки наконечников 8 так, чтобы каждый из них касался двух сторон профиля резьбы, положение кареток фиксируют.

Накопленную погрешность шага на заданной длине определяют путем измерения шагомером одного или несколько участков резьбы длиной 150—300 мм в одном осевом сечении в следующем порядке.

1. Шагомер настраивают по аттестованному образцу и определяют настроечный размер между наконечниками шагомера. Для повышения точности измерение проводят несколько раз.

2. Измеряют последовательно несколько участков резьбы контролируемого винта на заданной длине и фиксируют показания отсчетных устройств на каждом измеряемом участке. При измерении шагомером с двумя отсчетными устройствами определяют разность показаний отсчетных устройств.

3. С учетом показаний шагомера на аттестованном образце определяют значение погрешности резьбы на каждом измеряемом участке.

Контроль точности шага окончательно обработанных ходовых винтов производится в измерительной лаборатории с температурой $20 \pm 0,5^{\circ}\text{C}$. В единичном или мелкосерийном производстве для контроля шага используют универсальный микроскоп. Универсальные микроскопы снабжены измерительной шкалой длиной 200 мм, поэтому шаг резьбы контролируют с перестановкой ходового винта в специальных опорных люнетах. При такой проверке деталь базируют по наружному диаметру, поэтому наружный диаметр винта шлифуют с точностью не ниже 2 мкм и при установке тщательно выверяют относительно хода каретки микроскопа.

В серийном и массовом производствах для контроля точности шага ходовых винтов применяют специальные измерительные машины. Для контроля винтов длиной до 3000 мм классов точности Н и П применяют машину МС-14К конструкции ЭНИМСа. При измерении винт устанавливают в неподвижных центрах передней и задней бабок и люнетах и выверяют в горизонтальной и вертикальной плоскостях индикатором с ценой деления 0,01 мм. После этого в виток резьбы вводится сферический наконечник, закрепленный на

подвижной каретке с отсчетным устройством, которая перемещается параллельно измеряемому винту и зеркальной штриховой мере. Наконечник последовательно вводят в витки резьбы, поворотом барабана микровинта с ценой деления 0,5 мкм устанавливают штрихи штриховой меры в биссектор отсчетного устройства и снимают показания.

Для измерения периодической погрешности шага машина оснащена оптической делительной головкой. Так как штрихи на штриховой мере нанесены с интервалом 1 мм, винтовую линию в пределах одного оборота контролируют в точках поворота винта на углы, кратные продольному смещению витка резьбы на 1 мм.

Более современные и точные измерительные машины МС-49 оснащены лазерным интерферометром. Метод измерения лазерным интерферометром заключается в том, что, разделяя лазерный луч, его направляют в рефлектор-отражатель, установленный на перемещающейся по профилю резьбы каретке. Длина оптического хода первого светового пучка остается постоянной, а длина второго изменяется в зависимости от положения отражателя, связанного с измерительным наконечником. Разницу длин хода преобразуют и фиксируют блоком цифровой индикации и обрабатывают на вычислительном комплексе. В процессе измерения погрешности, вызванные изменением температуры в пределах $\pm 5^{\circ}\text{C}$, влажности воздуха и атмосферного давления, автоматически устанавливаются счетно-вычислительным устройством.

Машина позволяет контролировать как погрешность шага ходовых винтов, так и кинематическую погрешность передачи ВГК в сборе.

Техническая характеристика измерительной машины МС-49

Высота центров над рабочей поверхностью каретки, мм	100
Диаметр контролируемого изделия, мм:	
наибольший	320
наименьший	40
Наибольшая длина контролируемого изделия, мм	3000
Погрешность определения угловых интервалов между контрольными точками, с	3
Дискретность отсчета линейных перемещений, мкм	0,1
Частота вращения планшайбы передней бабки, об/мин	15, 30, 60
Систематическая погрешность измерения линейных перемещений в диапазоне, мкм:	
до 32 мм	0,5
до 500 мм	1,5
до 2000 мм	3,0

Кроме измерительных машин конструкции ЭНИМСа для контроля ходовых винтов высоких классов точности применяют измерительные машины производства ряда зарубежных фирм.

Поверхностные дефекты резьбы, их влияние на долговечность винта. Износстойкость деталей одинаковой формы и степени точности существенно отличается в зависимости от условий их обработки. Причиной этого является физико-механическое состояние

поверхностного слоя, характеризуемое его параметрами шероховатости, величиной и знаком остаточных напряжений, степенью на克莱па и распределением микротвердости.

Долговечность деталей шарикоподшипников и передач ВГК, работающих в условиях трения качения, определяется контактной выносливостью. Контактная выносливость ходовых винтов зависит от правильного выбора материала и качественного проведения термической и механической обработки.

Нагрузочная способность при заданной долговечности определяется величиной допустимого контактного давления $[\sigma]_k$, которое однозначно связано с твердостью поверхности слоя. Уменьшение нагрузочной способности при пониженной твердости Б. И. Павловым предложено учитывать коэффициентом K_t .

$HRC(HRC_0)$	60(61)	50(51,5)	40(41,5)	30(32)	25(27)
$[\sigma]_k$, МПа	3800	1900	760	380	280
K_t	1,0	0,5	0,2	0,1	0,08

Снижение твердости на 10 единиц по шкале Роквелла в результате нарушения режимов термической обработки либо резьбошлифования снижает нагрузочную способность в 2 раза.

Применение методов поверхностного упрочнения, при которых закаленный слой расположен на материале с исходной твердостью, требует определения минимальной глубины закаленного слоя. Возможны два случая разрушения упрочненного слоя, определяемых его глубиной, — отслаивание и нарушение сплошности.

Рассмотрим первый случай. Исследованиями [3] установлено, что зона максимальных растягивающих напряжений, возникающих при закалке ТВЧ, расположена на глубине в 1,3 раза большей, чем общая глубина закаленного слоя h . Их величина составляет 200—300 МПа при глубине слоя до 3 мм.

При качении шарика по винтовой канавке в поверхностном слое резьбы действуют нормальные и касательные напряжения. Максимальные касательные напряжения расположены на расстоянии $0,786b$ от поверхности, где b — меньшая полуось пятна контакта. При нагрузках, близких к предельным, $b=0,762$ мм, и максимальные касательные напряжения на винте с шагом 10 мм расположены на глубине 0,15 мм и равны 288 МПа. Таким образом, наибольшая опасность, с точки зрения отслаивания закаленного слоя, наступает при глубине последнего, равной 0,599 мм. Наложение максимальных растягивающих напряжений, возникающих при поверхностном упрочнении, и максимальных касательных напряжений в зоне контакта шарика с поверхностью резьбы является нежелательным и наступает при условии

$$h = 0,61b. \quad (11)$$

Во втором случае недостаточная глубина упрочненного слоя приводит к нарушению его сплошности при воздействии контактной нагрузки. При этом на упрочненный слой, расположенный на

мягкой подложке, действует распределенная по пятну контакта нормальная нагрузка. Увеличение нагрузки приводит к деформации поверхности и возникновению напряжений в упрочненном слое и подложке. При критической нагрузке напряжения в подложке равны пределу текучести и превышают предел прочности в упрочненном слое, что приводит к нарушению сплошности последнего.

В этом случае приближенно минимальную глубину упрочненного слоя определяют по формуле

$$h = \sqrt{\frac{2a}{[\sigma]}} \left(\frac{F}{\pi b} - \sigma_t a \right), \quad (12)$$

где a — большая полуось эллипса пятна контакта, мм; F — нормальная нагрузка на шарик, Н; $[\sigma]$ — предел прочности упрочненного слоя, МПа; σ_t — предел текучести подложки, МПа.

Окончательно глубину упрочненного слоя выбирают из следующих соображений:

1) глубина должна превышать рассчитанную по формулам (11) и (12) глубину на величину коэффициента ее запаса;

2) не следует выбирать глубину, значительно превышающую расчетную, во избежание увеличения деформации винтов.

Пример расчета минимально допустимой глубины упрочненного слоя. Исходные данные: диаметр шарика 6 мм; радиус профиля резьбы 3,12 мм; $F=1800$ Н; $a=1,436$ мм; $b=0,762$ мм; $[\sigma]=3800$ МПа; $\sigma_t=280$ МПа. Подставляя исходные данные в формулу (12), получим

$$h = \sqrt{\frac{2 \cdot 1,436}{3800}} \left(\frac{1800}{\pi \cdot 0,762} - 280 \right) = 0,60 \text{ мм.}$$

При коэффициенте запаса, равном двум, минимально допустимая глубина упрочненного слоя равна 1,2 мм.

Изменение твердости поверхностного слоя в процессе шлифования закаленной стали носит локальный характер. Образующиеся прижоги глубиной 90—100 мкм и твердостью HRC_0 50 снижают долговечность в 8 раз, а усталостную и изгибную прочность на 20—30 %. Интенсивные теплофизические процессы, происходящие в крайних поверхностных слоях при шлифовании, изменяют исходную структуру металла. Количество остаточного аустенита в стали увеличивается с 15—20 до 35—50 %. Это повышает износ в 1,5—1,7 раза и снижает контактную выносливость на 30—35 %. Исследование работоспособности передач ВГК выявило снижение грузоподъемности в 2 раза при наличии поверхностного прижога, снижающего твердость с HRC_0 61 до HRC_0 51,5.

Термомеханические эффекты и изменение структуры поверхностного слоя способствуют возникновению остаточных напряжений. Превышение ими величины предела прочности материала детали приводит к образованию поверхностных трещин. При изготовлении винтов качения характерно возникновение микротрещин на резьбовой поверхности. При этом брак винтов по микротрещинам со-

ставляет 2—3 %. Сравнительные испытания долговечности передач ВГК показывают, что наличие микротрещин на резьбовой поверхности винта на 30—40 % ускоряет разрушение.

При некоторых условиях шлифования на поверхности образуется слой вторично закаленного металла, просматривающийся на микрошлифе как ярко-белая, нетравящаяся полоса. Твердость этого слоя составляет $HV=11\,000$ МПа, что свидетельствует о его высоких механических качествах. Единого мнения о влиянии белого слоя на эксплуатационные свойства деталей нет, однако многие исследователи считают его образование положительным фактором, увеличивающим износостойкость, контактную выносливость и коррозионную стойкость деталей. Испытания специально подготовленных образцов при трении с диском из ультратвердого фарфора показывают, что износостойкость образцов, упрочненных шлифованием, в 3 раза выше, чем закаленных [10].

Режимы шлифования винтов качения в значительной степени влияют на качественные и количественные характеристики дефектной зоны. Характерным является следующее распределение микротвердости по глубине поверхностного слоя резьбы в зависимости от глубины шлифования и скорости детали. По мере увеличения глубины шлифования, при постоянной скорости детали расстет глубина отпущеной зоны и степень ее разупрочнения. С некоторой глубины шлифования разупрочнение сменяется упрочнением, твердость поверхности увеличивается по сравнению с исходной, а минимальная твердость отпущеного слоя уменьшается. Увеличение скорости детали в интервале режимов чистового шлифования уменьшает общую глубину дефектной зоны и максимальную степень разупрочнения, а также способствует возникновению вторично закаленного слоя с микротвердостью $H_{\mu}=10\,100 \div 11\,000$ МПа.

При шлифовании с большой поперечной подачей и малой скоростью детали, характерными для глубинного метода, зависимость изменяется, и увеличение скорости увеличивает глубину зоны структурных изменений.

Величина поперечной подачи в упрочняющем режиме влияет на размеры зоны структурных изменений лишь до определенного значения, после которого дальнейшее ее увеличение не оказывает заметного влияния. Таким образом, режимы шлифования неоднозначно взаимосвязаны величиной дефектной зоны, и необходим учет дополнительных факторов для регулирования качества поверхностного слоя.

Тепловые явления при резьбошлифовании. Отсутствие методов непосредственного измерения дефектного слоя в процессе шлифования обусловливает применение различных технологических параметров в качестве критериев глубины зоны структурных превращений.

Тепловой характер возникновения структурных превращений является причиной использования измеренных или расчетных значений температуры в зоне шлифования. Для ограничения возникновения дефектов используют различные конструкции естественных,

Рис. 23. Тепловая схема при шлифовании резьбы полукруглого профиля

полусинтетических и искусственных термопар, а также бесконтактный метод измерения температуры. Управление режимами по фактическим значениям температуры в контактной зоне весьма перспективно. Однако недостатки, присущие существующим преобразователям контактной температуры, в частности сложная конструкция и низкая надежность, препятствуют их широкому применению в производственных условиях.

Поэтому для определения температуры в зоне контакта шлифовального круга с деталью используют теоретические и эмпирические зависимости между температурой, параметрами теплового источника и режимом шлифования.

Тепловая задача при резьбошлифовании описывается дифференциальным уравнением теплопроводности (рис. 23)

$$\frac{\partial T}{\partial t} = a \left(\frac{\partial^2 T}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial T}{\partial r} + \frac{1}{r^2} \frac{\partial^2 T}{\partial \gamma^2} \right) \quad (13)$$

при следующих краевых условиях:

$$T|_{t=0} = 0; \quad T|r=\infty = 0;$$

$$-\lambda \frac{\partial T}{\partial r} \Big|_{\substack{r=0 \\ 0 < t < t_0}} = q_0; \quad \frac{\partial T}{\partial r} \Big|_{\substack{r=0 \\ t > t_0}} = 0; \quad \frac{\partial T}{\partial \gamma} \Big|_{r=\text{const}} = 0,$$

где r — расстояние от линейного источника до рассматриваемой точки, м; t — текущее время, с; λ — коэффициент теплопроводности тела, $\text{Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{град})$; a — коэффициент температуропроводности тела, $\text{м}^2/\text{с}$; γ — угловая координата.

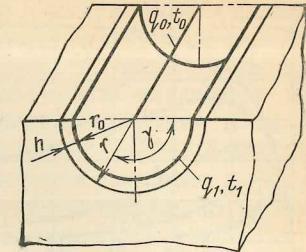
Решением уравнения (13) является выражение

$$H = 2 \sqrt{F_0 \exp \left(-\frac{2\theta}{RK_i} - c \right)}. \quad (14)$$

Здесь $H=h/l$; $F_0=(at_1)/l^2$; $K_i=(q_0l)/(\lambda T_n)$; $\theta=T_c/T_n$, где l — длина дуги контакта, м; T_n — масштабная температура, $^{\circ}\text{C}$.

Безразмерная глубина H проникновения температуры θ определяется безразмерными комплексами, один из которых характеризует время действия теплового источника, второй — его интенсивность, а третий — учитывает размеры источника. Величина безразмерного радиуса канавки R оказывает влияние на глубину H в комплексе с критерием Кирпичева K_i , и их произведение можно рассматривать в качестве комплекса, характеризующего интенсивность теплового потока детали с определенными геометрическими размерами теплового источника.

Так как общая глубина зоны структурных превращений в первую очередь зависит от максимальной температуры в рассматри-



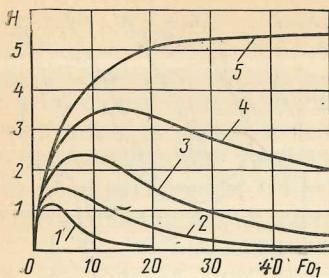


Рис. 24. Зависимость глубины H от величины безразмерного комплекса $RFoKi$:
 1 — $RFo_1Ki_1=1$; 2 — $RFo_1Ki_1=2$; 3 — $RFo_1Ki_1=4$; 4 — $RFo_1Ki_1=8$; 5 — $RFo_1Ki_1=20$

ваемой точке детали, то формула (14) может быть использована для расчета при условии подстановки в нее значений температуры, вызывающей структурные превращения. При этом глубина зоны измененных структур в поверхностном слое резьбы полукруглого профиля прямо пропорциональна корню квадратному из времени действия источника и экспоненциально убывает с уменьшением комплекса $RFoKi$.

Для выявления особенностей изменения глубины зоны структурных превращений проанализируем влияние отдельных параметров теплового источника и их комплексов.

В условиях механической обработки резьбы полукруглого профиля размеры теплового источника не претерпевают изменений в течение одного рабочего хода. Изменение величины теплофизических параметров процесса в течение этого времени существенно и обусловлено нестабильностью режущих свойств инструмента, а также изменением скорости детали. Поэтому целесообразно рассмотреть влияние комплекса теплофизических параметров процесса, например произведения критериев Фурье, Кирпичева и радиуса R , на глубину зоны измененных структур.

На рис. 24 показаны кривые зависимости H от Fo при различной величине произведения $RFoKi$. Физический смысл этого произведения заключается в том, что оно характеризует количество энергии, поглощаемой обрабатываемой поверхностью. При любом значении критерия Фурье с увеличением этого количества энергии глубина дефектной зоны возрастает. Незначительное влияние критерия Кирпичева при значениях $Ki > 4$ и, следовательно, малых значениях критерия Фурье обеспечивает превалирующее воздействие последнего на увеличение глубины дефектного слоя. При больших значениях критерия Фурье и постоянном количестве поглощаемой обрабатываемой поверхностью энергии возрастает роль критерия Кирпичева, значение которого уменьшается с увеличением критерия Фурье. Влияние критерия Кирпичева при малых значениях весьма велико, и это приводит к существенным различиям величины дефектного слоя при увеличении энергии, поглощаемой поверхностью.

Проведенный анализ выявляет энергетический характер зависимости глубины зоны структурных превращений (ГЗСП) от параметров теплового источника. При постоянной величине температуры, обуславливающей структурные превращения, эта зависимость определяется величиной безразмерного комплекса $RFoKi$,

который характеризует количество энергии, поступающей в деталь через обрабатываемую поверхность.

Установленные закономерности позволяют предположить существование комплекса, включающего параметры теплового источника, взаимосвязанного с режимом резьбошлифования и однозначно определяющего ГЗСП. Такой комплекс может быть использован в качестве технологического критерия глубины дефектного слоя, необходимого для разработки рекомендации по назначению рациональных режимов резьбошлифования.

Технологические параметры, используемые для определения и регулирования глубины дефектного слоя резьбы. Взаимосвязь между теплофизическими параметрами и режимом обработки устанавливают расчетным или экспериментальным путем. Критерии подобия теплофизических процессов, используемые в формуле (14), включают параметры t_1 , l и q_1 , первые два из которых определяются расчетным путем, а последний экспериментальным.

Так как время действия теплового источника зависит от длины контакта и скорости детали, причем скорость детали известная величина, то для выявления взаимосвязи элементов режима и глубины дефектного слоя необходимо определить длину дуги контакта шлифовального круга и детали.

В отличие от остальных видов шлифования, при профильном шлифовании форма пятна контакта является криволинейной, что обусловлено изменением глубины резания по профилю. Установлено, что на первом рабочем ходе шлифования резьбы полукруглого профиля длина дуги контакта является величиной переменной и определяется выражением

$$l = \sqrt{\frac{Dd}{D+d}} \sqrt{r_0^2 - y^2} - a, \quad (15)$$

где D — диаметр шлифовального круга, м; d — диаметр обрабатываемой резьбы, м; y — текущая координата, м; a — расстояние, определяющее положение шлифовального круга в направлении перечной подачи, м.

При шлифовании заготовки с предварительно обработанным профилем радиусом r_1 зависимость длины дуги контакта изменяет вид на участке с координатами (рис. 25)

$$y = \pm \sqrt{r_1^2 - (a + t_p)^2}. \quad (16)$$

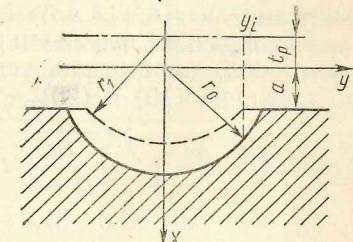


Рис. 25. Схема расчета длины дуги контакта при шлифовании резьбы полукруглого профиля

На этом участке длина дуги контакта

$$l = \sqrt{\frac{Dd}{D+d} \sqrt{r_0^2 - y^2} - \sqrt{r_1^2 - y^2}} + t_p, \quad (17)$$

где t_p — глубина резания, м.

Рассмотрим частный случай шлифования, при котором радиусы профиля круга и заготовки равны. Этот случай соответствует многопроходному шлифованию резьбы полукруглого профиля.

Как следует из формулы (17), на участке, координата которого определяется из выражения (16), длина дуги контакта постоянна:

$$l = \sqrt{\frac{Dd}{D+d} t_p}. \quad (18)$$

Площадка контакта имеет форму трапеции с криволинейными боковыми сторонами, определяемыми выражением (17). С учетом (18) время действия теплового источника почти на всей площадке обратно пропорционально скорости детали v :

$$t = \frac{1}{v} \sqrt{\frac{Dd}{D+d} t_p}. \quad (19)$$

Интенсивность теплового потока зависит от режущей способности шлифовального круга и условий теплообразования в зоне контакта.

Шлифовальный круг состоит из абразивных зерен и пористой связки. В процессе стружкоудаления существует незначительное количество зерен. Если рассматривать теплообразование в зоне контакта, то количество теплоты, образующейся при работе режущих зерен, незначительно, а остальное тепло выделяется при трении скользящих абразивных зерен и связки. Из-за отсутствия обоснованной информации о законе распределения теплового потока по площадке контакта, а также вследствие незначительного влияния закона распределения на величину максимальной температуры, обычно считают интенсивность теплового потока равномерно распределенной по площадке контакта [9]. В этом случае интенсивность теплового потока, поступающего в деталь,

$$q = (K_2 N)/S, \quad (20)$$

где K_2 — коэффициент распределения теплового потока между деталью и кругом; N — мощность шлифования, Вт; S — площадь зоны контакта круга с деталью, м^2 .

Преобразуем выражение (14) с использованием полученных зависимостей параметров теплового источника от режимов резьбошлифования (19) и (20):

$$h = K_1 \sqrt{\frac{4a}{v}} \sqrt{\frac{Dd}{D+d} t_p} \exp \left[-\frac{\lambda T_n (\varphi_1 + \varphi_2)}{K_2 N} \sqrt{\frac{Dd}{D+d} t_p} + c \right] \quad (21)$$

где K_1 и K_2 — коэффициенты.

Из формулы (21) следует, что глубина дефектного слоя зависит от диаметров шлифовального круга и детали, глубины резания и скорости детали. Кроме этого, мощность шлифования учитывает влияние СОЖ на тепловыделение в зоне контакта, режимы правки, режущую способность и скорость шлифовального круга.

Для разработки структуры технологического критерия необходимо выявить влияние каждого из перечисленных выше факторов на глубину дефектного слоя и определить наиболее существенные из них. С этой целью проанализируем формулу (21). Основные элементы режима, к которым относятся глубина резания и скорость детали, влияют на глубину дефектной зоны сложным образом.

Для уточнения степени воздействия отдельных элементов режима проведем численный анализ при прочих постоянных условиях. Расчеты выполнены для условий шлифования ходовых винтов диаметром $d=60$ мм, радиусом профиля $r_0=3,12$ мм шлифовальным кругом диаметром $D=400$ мм с величиной поперечной подачи $t_p=0,2$ мм, скоростью детали $v=0,0333$ м/с и мощностью шлифования $N=1500$ Вт.

При шлифовании резьбы ходовых винтов применяют круги диаметром $D=350 \div 500$ мм. Результаты расчета глубины дефектного слоя показывают, что влияние изменения диаметра шлифовального круга на эту глубину незначительное.

D , мм	0,35	0,40	0,45	0,50
h , мм	0,184	0,184	0,184	0,185

Ходовые винты качения изготавливают диаметром $d=0,03 \div 0,1$ м. Изменение глубины дефектного слоя при этом незначительно (не превышает 3%). Влияние диаметра резьбы на ГЗСП представлено ниже.

d , мм	0,03	0,04	0,05	0,06	0,08	0,10
h , мм	0,183	0,184	0,185	0,184	0,182	0,179

Поэтому изменение диаметральных размеров детали и круга в расчетах можно не учитывать.

С целью установления влияния глубины резания и скорости детали на величину активной мощности привода шлифовального круга проводились специальные эксперименты. На резьбошлифовальном станке MB127 кругами 44A16CM1K8 шлифовали ходовые винты из стали 8ХФ с твердостью резьбовой поверхности HRC_3 59—61. Длина резьбовой части винтов $l_p=0,5$ м; диаметр $d=60$ мм; радиус профиля $r_0=3,12$ мм. Режимы обработки изменяли в соответствии с планом полного двухфакторного эксперимента. В результате обработки результатов эксперимента получена зависимость вида

$$N = C t_p^x v^y, \quad (22)$$

где $C=653 \cdot 10^5$; $x=1,04$; $y=0,69$; $t_p=0,13 \div 0,26$ мм; $v=0,02 \div 0,05$ м/с.

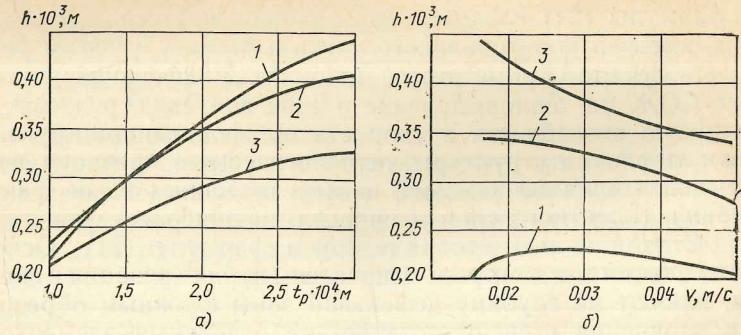


Рис. 26. Влияние глубины шлифования (а) и скорости детали (б) на глубину дефектного слоя:
а — 1 — $v=0,015$ м/с; 2 — $v=0,025$ м/с; 3 — $v=0,05$ м/с; б — 1 — $t_p=0,1$ мм; 2 — $t_p=0,2$ мм; 3 — $t_p=0,3$ мм

Из выражения (22) следует, что мощность шлифования возрастает с увеличением скорости детали пропорционально увеличению глубины резания. Взаимосвязь глубины резания и мощности оказывает существенное влияние на характер изменения глубины отпущеного слоя (рис. 26, а). Эта глубина увеличивается во всем исследованном диапазоне.

Характер влияния скорости детали при расчете с использованием фактических значений величины мощности шлифования показан на рис. 26, б.

Таким образом основными элементами режима, определяющими ГЗСП, являются глубина резания, скорость детали и мощность шлифования. ГЗСП увеличивается с увеличением глубины резания и мощности шлифования. ГЗСП последовательно увеличивается, достигает максимального значения и уменьшается при увеличении скорости детали.

Из проведенного анализа следует, что структура критерия для определения глубины зоны структурных превращений должна включать факторы, взаимосвязанные с мощностью шлифования, скоростью детали и глубиной резания при резьбошлифовании.

Отдельные элементы режима, составляющие критерий, должны нести достаточный объем информации о процессе обработки. Необходимыми условиями являются простота, надежность и высокая точность их измерения. Развитие средств автоматизации требует, чтобы выходной сигнал изменения величины этих элементов обеспечивал простоту преобразования для использования в системах автоматического регулирования.

Для выявления совокупности элементов режима, составляющих технологический критерий, воспользуемся методом, который был использован при анализе зависимости величины зоны структурных превращений от безразмерных комплексов, характеризующих теплофизические процессы. С этой целью проанализируем формулы

(14) и (21). Из этих формул следует, что глубина дефектного слоя определяется величиной безразмерного комплекса $FoKi$. Анализ критериев, входящих в этот комплекс, показывает, что по физическому смыслу он аналогичен произведению $K_2q_1t_1$. Это произведение включает два параметра, связанных с режимом обработки. Время действия теплового источника определяется скоростью детали и длиной дуги контакта; она функционально взаимосвязана с глубиной резания, а также формой, размерами детали и шлифовального круга.

Интенсивность потока зависит от мощности шлифования и площади зоны контакта шлифовального круга с деталью. При этом мощность зависит от глубины резания, скорости детали и режущей способности круга. Следовательно, время действия теплового источника и интенсивность теплового потока несут информацию об изменении практических условий процесса обработки резьбы. Комплексное воздействие этих параметров полностью определяет ГЗСП, и поэтому они могут быть использованы при разработке технологического критерия. Физический смысл произведения времени действия теплового источника на интенсивность теплового потока заключается в том, что это произведение характеризует количество тепла, поглощаемого единицей обрабатываемой поверхности детали за время действия теплового источника, и является удельной поверхностной энергией, поступающей в деталь через обрабатываемую поверхность за время шлифования: $W = K_2q_1t_1$.

Удельная энергия W несет необходимую информацию о процессе и определяет глубину дефектной зоны, однако использовать ее в качестве технологического критерия в приведенном выше виде невозможно из-за сложности и трудоемкости измерения входящих в ее состав параметров.

Установлено, что с использованием зависимости времени действия теплового источника, определяемого по формуле (19), и интенсивности теплового потока, определяемого по формуле (20), от элементов режима обработки, а также размеров детали и круга, удельная поверхностная энергия шлифования [7]

$$W = (K_2N)/(VL), \quad (23)$$

где L — длина дуги контакта в сечении, перпендикулярном к направлению окружной подачи, м.

Длина дуги L связана однозначной зависимостью с глубиной резания и размерами нитки резьбы в осевом сечении, причем для резьбы полукруглого профиля

$$L = 2r_0 \arccos [(r_0 - t_p)/r_0].$$

Взаимосвязь режимов резьбошлифования и удельной поверхностной энергии исследовалась экспериментально. Полученные результаты показывают, что в исследованном диапазоне режимов удельная поверхностная энергия интенсивно возрастает при увеличении глубины резания (рис. 27, а). При этом зависимость близка к линейной, так как мощность шлифования, рассчитываемая по

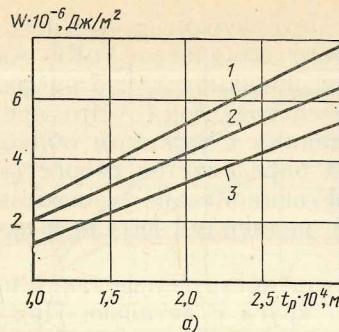


Рис. 27. Влияние глубины шлифования (а) и скорости детали (б) на величину удельной поверхности энергии шлифования
а — 1 — $v=0,015$ м/с; 2 — $v=0,025$ м/с; 3 — $v=0,05$ м/с; б — 1 — $t_p=0,1$ мм; 2 — $t_p=0,2$ мм; 3 — $t_p=0,3$ мм

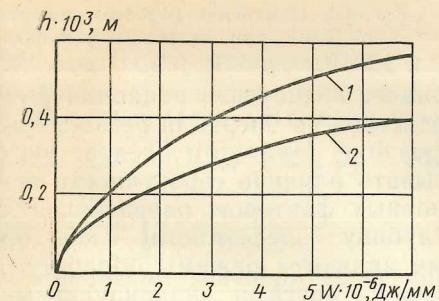
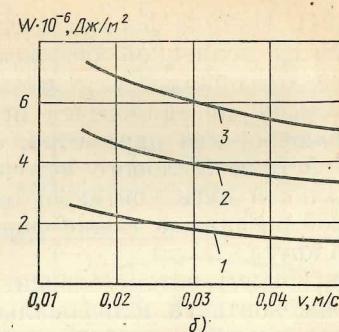


Рис. 28. Взаимосвязь удельной поверхности энергии шлифования и глубины дефектного слоя:
1 — $T_M=200$ °C; 2 — $T_M=400$ °C



Рис. 29. Изменение глубины дефектного слоя при постоянной величине удельной поверхности работы шлифования:
1 — $W=2 \cdot 10^6$ Дж/м²; 2 — $W=4 \cdot 10^6$ Дж/м²; 3 — $W=6 \cdot 10^6$ Дж/м²

формуле (22), пропорциональна глубине резания. Влияние скорости детали менее существенно, и при увеличении ее удельная поверхностная энергия уменьшается (рис. 27, б).

Скорость обработки детали на станках MB127, MB138 регулируют бесступенчато с помощью привода с электромашинным усилителем и контролируют прибором, расположенным на пульте управления. Активную мощность привода шлифовального круга с достаточной степенью точности измеряют стандартными средствами. При этом электрическая природа сигнала изменения параметров процесса обработки, входящих в выражение (23), упрощает преобразование и использование их в дальнейшем для автоматизации процесса.

Таким образом, разработанный критерий достаточно прост и по своему физическому смыслу взаимосвязан с глубиной дефектного слоя. Для применения этого критерия при резьбошлифовании необходимо установить вид этой взаимосвязи. Для этого используем формулу (14):

$$h = \left[\frac{2K_1}{\sqrt{K_3}} \exp \left(-\frac{T_c}{T_n K_3} - \frac{c}{2} \right) \sqrt{\frac{ar_0}{\lambda T_n}} \right] V \bar{w}, \quad (24)$$

где $K_3 = (Nr_0 K_2) / (\lambda T_n l L)$.

Из выражения (24) следует, что удельная поверхностная энергия шлифования является основным фактором, определяющим изменение глубины поверхностного слоя, претерпевшего структурные превращения. Кроме этого, необходимо учитывать теплофизические параметры обрабатываемой стали, температуру, вызывающую структурные превращения, и радиус профиля резьбы.

Для широкого диапазона режимов при $W = (2-7) \cdot 10^6$ Дж/м² максимальная глубина дефектного слоя зависит от удельной поверхностной энергии практически линейно (рис. 28). Изменение температуры, вызывающей структурные превращения, в узком диа-

пазоне незначительно влияет на эту глубину. Последняя увеличивается на 40 % при увеличении температуры в 2 раза.

Известно, что изменение скорости нагрева меняет температуру, вызывающую структурные превращения. Выявленная зависимость позволяет утверждать, что погрешность от допущения о постоянстве этой температуры для принятых условий шлифования резьбы полукруглого профиля будет незначительна.

В общем случае глубина дефектного слоя, определяемая по формуле (24), зависит от величины безразмерного коэффициента K_3 . Этот коэффициент характеризует воздействие изменения теплового потока и размеров источника на глубину слоя, претерпевшего структурные превращения. Анализ влияния этого коэффициента показывает, что в широких пределах изменения удельной энергии W он не является определяющим. Изменение глубины дефектного слоя при различной величине K_3 подтверждает это (рис. 29).

Так как мощность шлифования на проходе при затуплении или осыпании шлифовального круга возрастает или уменьшается не более чем в 1,5 раза, то соответствующее изменение коэффициента K_3 приводит к колебанию глубины дефектного слоя в пределах $h < 10\%$.

Таким образом, удельная поверхностная энергия является основным фактором, определяющим глубину зоны структурных превращений, а остальные факторы лишь незначительно изменяют характер этой зависимости.

Расчетные и фактические значения глубины дефектного слоя при резьбошлифовании приведены на рис. 30.

Предотвращение шлифовочных дефектов при шлифовании резьбы ходовых винтов путем назначения рациональных режимов. Повышение качества винтов качения при использовании имеющихся резервов увеличения производительности труда предусмат-

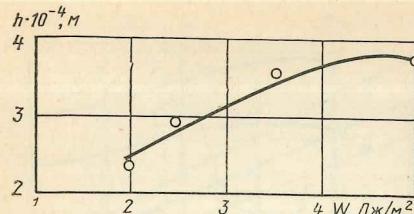


Рис. 30. Изменение глубины дефектного слоя при резьбошлифовании

ривает назначение рациональных режимов на операции резьбошлифования. При этом следует учитывать влияние совокупности основных факторов, определяющих глубину дефектного слоя по профилю резьбы. Этими факторами являются режимы обработки, режущая способность шлифовального круга и индивидуальные особенности заготовок винтов.

Рассмотрим влияние индивидуальных особенностей заготовок винтов на температурный режим в зоне шлифования. Накопленная погрешность шага, радиальное биение и погрешность профиля радиуса резьбы изменяются в пределах партии заготовок и достигают значений, соизмеримых с припуском на последующую обработку. Это является причиной неравномерного распределения припуска по профилю шлифовального круга и изменяет характер структурных превращений по профилю резьбы. Для определения максимальной глубины дефектного слоя в этих условиях необходимо оценить влияние каждой из величин, характеризующих индивидуальные особенности заготовок, независимо от остальных. Для этого рассмотрим тепловые явления в поверхностном слое резьбы при шлифовании в зависимости от точности настройки станка.

Замечено, что в зависимости от настройки резьбошлифовального станка наблюдается закономерная неоднородность структурных изменений по профилю резьбы винтов. В одних случаях прижоги появляются с правой стороны профиля, в других — с левой. Одной из причин указанной неоднородности является несоответствие угла разворота шлифовального круга углу подъема шлифуемой резьбы $\Delta\varphi$. Несоответствие углов приводит к изменению длины дуги контактирования на участках пересечения профильной поверхности круга с цилиндрической поверхностью обрабатываемого винта, причем длина дуги контакта на этих участках определяется из уравнения (17).

При точной настройке станка пятно контакта круга с изделием имеет форму трапеции с криволинейными боковыми сторонами. Погрешность разворота круга на угол подъема шлифуемой резьбы приводит к искажению формы пятна контакта. Экстремальные значения длины дуги определяются из условия пересечения боковых сторон пятна контакта с линиями пересечения предварительно обработанной резьбы и цилиндрической поверхности винта.

Степень влияния несоответствия углов на изменение длины дуги контакта круга с левой и правой частями винтовой поверхности резьбы полукруглого профиля следует оценить коэффициентом неравномерности:

$$K_l = l_{\max}/l_{\min}, \quad (25)$$

где l_{\max} , l_{\min} — максимальная и минимальная длины дуг контакта, м.

В зависимости от величины $\Delta\varphi$ коэффициент неравномерности

$$K_\varphi = (\operatorname{ctg} \Delta\varphi + \operatorname{ctg} \beta)/(\operatorname{ctg} \Delta\varphi - \operatorname{ctg} \beta),$$

$$\text{где } \operatorname{ctg} \beta = \sqrt{\frac{Dd}{(D+d)t_p}}.$$

Расчетные значения коэффициента неравномерности для различной величины несоответствия угла разворота шлифовального круга углу подъема винтовой поверхности резьбы $\Delta\varphi$ при диаметре шлифовального круга $D=0,4$ м, диаметре винта $d=0,06$ м, радиусе профиля резьбы $r_0=3,12 \cdot 10^{-3}$ м и поперечной подаче круга на врезание $t_p=0,6 \cdot 10^{-3}$ м приведены ниже.

$\Delta\varphi, {}^\circ$	0	15	30	40	50	60
K_φ	1,000	1,301	1,705	2,067	2,542	3,183

Расчетные данные свидетельствуют о том, что погрешность разворота шлифовального круга в пределах одного градуса приводит к изменению в 3 раза и более длины дуги контакта круга с деталью.

При этих условиях пропорционально возрастает время воздействия теплового источника, что оказывает существенное воздействие на перераспределение пространственно-временного температурного поля, определяющего характер структурных превращений и глубину их распространения.

При наличии накопленной погрешности шага резьбы ΔP коэффициент неравномерности

$$K_p = \sqrt{\frac{r_0^2 - [\sqrt{r_1^2 - (a+t_p)^2} - \Delta P]^2 - a}{r_0^2 + [\sqrt{r_1^2 + (a+t_p)^2} - \Delta P]^2 - a}}.$$

Зависимость коэффициента неравномерности от накопленной погрешности шага резьбы для условий многопроходного резьбошлифования винта диаметром $d=0,06$ м, профиля радиусом $r_0=3,07 \cdot 10^{-3}$ м при глубине резания $t_p=1,5 \cdot 10^{-4}$ м приведена ниже.

$\Delta P, \text{ мкм}$	0	10	20	30	40	50
K_p	1	1,17	1,43	1,86	2,34	4,03

С увеличением погрешности от нуля до 50 мкм коэффициент неравномерности возрастает от единицы до четырех. При шлифовании заготовки винта с исходной величиной биения δ глубина резания изменяется в пределах одного оборота детали на величину δ . При этом изменяется длина дуги контакта и время нагрева поверхности, определяющее возникновение шлифовочных дефектов. Неравномерность длины дуги контакта при наличии радиальной

деформации винта можно оценить коэффициентом, определяемым по формуле (25), причем для этого случая

$$K_{\delta} = \sqrt{1 + \frac{\delta}{t_{p \min}}},$$

где $t_{p \min}$ — минимальная глубина резания в пределах одного оборота детали, м.

Расчетные значения изменения величины коэффициента неравномерности в зависимости от отношения величины радиального биения к минимальной глубине резания представлены ниже.

$\delta/t_{p \min}$	0	0,5	1,0	1,5	2,0	2,5	3,0
K_{δ}	1,000	1,235	1,414	1,581	1,732	1,871	2,000

Приведенные данные свидетельствуют о том, что радиальное биение винтов при $\delta < t_{p \min}$ изменяет отношение длины дуги контакта в пределах одного оборота винта в 1,4 раза. Следовательно, увеличение радиального биения способствует появлению шлифовочных дефектов на части винтовой поверхности резьбы в пределах одного оборота заготовки.

Колебание радиуса профиля резьбы обусловлено различными причинами. Одной из них является погрешность формообразования инструмента для предварительной обработки резьбы.

При предварительном шлифовании профиля резьбы допускаются отклонения радиуса профиля шлифовального круга $\Delta r_0 = -0,07$ мм. Неправильно выбранные режимы резьбошлифования способствуют неравномерному изнашиванию профиля круга на проходе. По этой причине погрешность радиуса профиля может достигать величины $\Delta r_0 = 0,1 \div 0,15$ мм. Изменение длины дуги контакта вследствие колебания радиуса профиля может быть оценено коэффициентом неравномерности, определяемым по формуле (25), который в этом случае составляет

$$K_r = \sqrt{\frac{\sqrt{r_0^2 - y^2} - \sqrt{r_{1 \min}^2 - y^2} + t_p}{\sqrt{r_0^2 - y^2} - \sqrt{(r_{1 \min} + \Delta r)^2 - y^2} - y^2 + t_p}},$$

где $r_{1 \min}$ — минимальный радиус предварительно обработанного профиля резьбы, м.

Результаты расчета величины коэффициента неравномерности при $r_0 = 3,07 \cdot 10^{-3}$ м, $y = 2,62 \cdot 10^{-3}$ м, $r_{1 \min} = 2,87 \cdot 10^{-3}$ м и $t_p = 0,13 \times 10^{-3}$ м представлены ниже.

Δr мм	0	0,05	0,10	0,15	0,20	0,25
K_r	1,000	1,120	1,283	1,527	1,964	3,213

Из приведенных данных следует, что в пределах возникающей погрешности радиуса профиля резьбы длина дуги контакта увеличивается в 1,5 раза.

При наличии нескольких индивидуальных особенностей заго-

товки величину коэффициента неравномерности определяют по формуле

$$K_l = K_{\phi} K_p K_{\delta} K_r.$$

Рассмотрим изменение глубины дефектного слоя h_i в пределах периода изменения коэффициента неравномерности по отношению к глубине h_0 , соответствующей глубине при шлифовании идеальных заготовок и определяемой по формуле (24). В этом случае коэффициент неравномерности равен отношению текущего l_i и nominalного l_0 значений длины дуги контакта: $K_{li} = l_i/l_0$.

С учетом этого из формулы (24) определяем текущие значения глубины дефектного слоя в зависимости от величины коэффициента неравномерности.

$$\text{При } l_i > l_0 \quad h_i = h_0 \sqrt{K_{li}}.$$

$$\text{При } l_i < l_0 \quad h_i = h_0 \sqrt{1/K_{li}}.$$

$$\text{При } l_i = l_0 \quad h_i = h_0.$$

Для проверки установленных зависимостей проводили эксперименты на станке MB127 при шлифовании винтов диаметром $d = 0,06$ м, профиля радиусом $r_0 = 3,12 \cdot 10^{-3}$ м. Величину коэффициента устанавливали следующим образом. Перед обработкой настраивали шлифовальный круг симметрично профилю резьбы заготовки. Затем с помощью корректора осевого положения круга смещали последний на заданную величину, имитируя воздействие накопленной погрешности шага резьбы на неравномерность длины дуги контакта. Величину смещения контролировали индикатором с ценой деления 1 мкм. Величину коэффициента неравномерности рассчитывали. Глубину дефектного слоя определяли на изготовленных микротраках методами металлографии и контроля микротвердости. Результаты эксперимента и расчетные данные приведены в табл. 10.

10. Расчетные и экспериментальные значения глубины дефектного слоя по профилю резьбы

Условие	Расчетные и экспериментальные значения h_i/h_0^* при K_{li}			
	1	2	3	4
$l_i < l_0$	0,9/1,0	0,8/0,71	0,7/0,58	0,6/0,50
$l_i = l_0$	—	1,3/1,41	1,6/1,73	1,9/2,0
$l_i > l_0$	—	—	—	—

* В числителе приведены экспериментальные, а в знаменателе расчетные значения глубины дефектного слоя.

Анализ влияния отдельных факторов на глубину дефектного слоя выявил двойственный характер их воздействия на параметры теплового источника, действующего в зоне контакта шлифовального круга с резьбой.

При этом изменение формы и размеров теплового источника однозначно связано с режимами резьбошлифования и индивидуальными особенностями заготовок винтов и может быть установлено заранее с учетом фактической глубины резания, радиуса профиля, накопленной погрешности шага и радиального бieniaия резьбы. Эти величины могут быть измерены до начала обработки на измерительной установке или непосредственно при резьбошлифовании. Полученные данные о форме и размерах теплового источника в совокупности с фактической величиной скорости обработки детали, измеряемой преобразователем скорости непосредственно на станке, полностью определяют продолжительность нагрева отдельных участков профиля резьбы.

Режущая способность шлифовального круга зависит от многих причин и изменяется в процессе шлифования. Существующие методы предварительной оценки режущей способности неэффективны, что затрудняет определение энергетических параметров по известным режимам резьбошлифования. Указанный недостаток устраняется при непосредственном измерении энергетических параметров процесса, например мощности шлифования. Следует учитывать, что в течение рабочего хода шлифовальный круг может осыпаться, затупляться или работать в режиме самозатачивания, а мощность шлифования соответственно уменьшается, увеличивается или остается неизменной. Поэтому для исключения влияния изменения мощности шлифования на глубину дефектного слоя разработаны рекомендации по определению условий работы круга в режиме самозатачивания [7]. Для кругов из монокорунда этот режим наступает при интенсивности шлифования $Q = 30 \div 55 \text{ мм}^3/\text{с}$. Назначение рациональных режимов резьбошлифования указанным путем возможно при обработке на универсальных станках с применением стандартных измерительных устройств при условии разработки номограммы для определения глубины дефектного слоя в зависимости от скорости детали, глубины резания и мощности шлифования.

При назначении режимов резьбошлифования используют рекомендации по распределению припуска на рабочих ходах и определению исходной скорости детали. При построении номограммы для выбора рациональных режимов резьбошлифования с учетом индивидуальных особенностей заготовок винтов использована зависимость удельной поверхностной энергии шлифования от глубины резания, радиуса профиля резьбы, скорости детали и мощности шлифования (рис. 31). Глубина дефектного слоя определена в зависимости от величины удельной поверхностной энергии и коэффициента неравномерности, характеризующего индивидуальные особенности заготовок винта.

При назначении режимов на универсальном оборудовании с

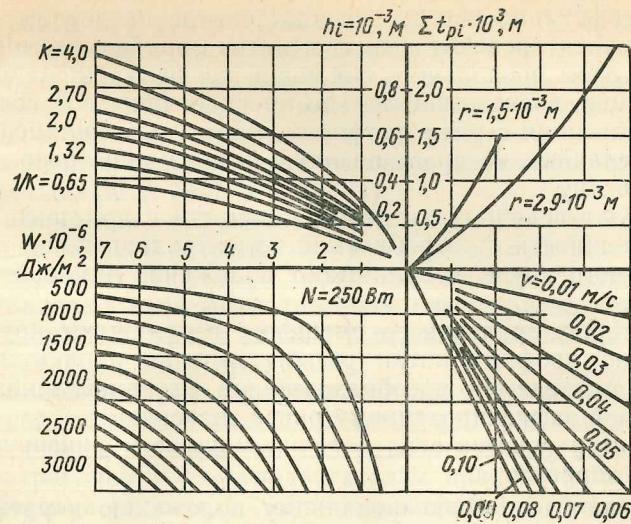


Рис. 31. Номограмма для определения рациональных режимов резьбошлифования с учетом индивидуальных особенностей заготовок

применением стандартных измерительных средств используют все квадранты номограммы. При автоматическом регулировании режимов резьбошлифования используется левый верхний квадрант номограммы; измеряют глубину резания и начальную скорость детали, вычисляют величину удельной поверхностной энергии шлифования, сравнивают ее с допустимым значением для заданной глубины дефектного слоя и устраниют рассогласование путем регулирования скорости детали. Для назначения рациональных режимов необходимо осуществить предварительную настройку станка и контроль индивидуальных особенностей.

Так как несовпадение углов разворота шлифовального круга и подъема резьбы является одной из причин неравномерности структурных превращений по профилю резьбы, разворот круга производят в соответствии с разработанными рекомендациями.

На следующем этапе настраивают шлифовальный круг в нитку резьбы, для чего можно использовать способ настройки резьбошлифовального станка [А. с. 812546 (СССР)].

Сущность способа заключается в том, что при смешении шлифовального круга относительно профиля нитки резьбы заготовки на первом рабочем ходе круг работает только одной (правой или левой) частью профиля, и величина измеренной активной мощности привода шлифовального круга характеризует положение шлифовального круга относительно профиля резьбы.

Способ осуществляют следующим образом. Величину врезания круга в левую и правую части профиля обрабатываемой резьбы выбирают из условия устранения следов врезания на окончательно обработанной поверхности.

При шлифовании резьбы ходовых винтов на первом рабочем ходе круг ориентировано вводят в нитку обрабатываемой резьбы.

Корректором продольного смещения круга перемещают последний, например, влево относительно профиля винтовой поверхности резьбы до касания с этим профилем, после чего круг перемещают влево на величину, не превышающую части минимального припуска на обработку.

Фиксируют величину активной мощности с помощью преобразователя мощности, потребляемой электродвигателем привода шлифовального круга, и принимают положение лимба корректора за нулевое.

Корректором продольного смещения перемещают круг вправо относительно профиля нитки резьбы изделия до тех пор, пока мощность, измеряемая преобразователем активной мощности, не станет равной зафиксированному ранее значению.

В момент равенства этих величин мощности фиксируют новое положение корректора.

Определяют по зафиксированному положению корректора величину перемещения шлифовального круга вправо и перемещают круг влево относительно профиля нитки обрабатываемой резьбы на величину, равную половине, определенного выше перемещения. На этом настройку резьбошлифовального станка заканчивают.

Распределение припуска по профилю резьбы изменяется по длине резьбовой части винта в зависимости от величины накопленной погрешности шага и места настройки круга в нитку резьбы. Если учесть, что накопленная погрешность по длине резьбы распределена линейно, то неравномерность припуска может быть снижена вдвое при настройке круга посередине резьбовой части винта.

Поэтому позиционирование шлифовального круга осуществляют следующим образом. Настраивают шлифовальный круг в начале резьбовой части известным способом и фиксируют показания лимба корректора осевого смещения круга. Затем производят эту настройку в конце резьбовой части, вновь фиксируют показания лимба корректора, вычисляют сумму зафиксированных значений и делят ее пополам. После этого шлифовальный круг смещают с помощью корректора в положение, соответствующее полученному значению.

Этот способ настройки позволяет уменьшить неравномерность распределения припуска и, как следствие, вероятность возникновения прижогов на краях резьбовой части винта.

Приведенные способы позволяют автоматизировать настройку станка и повышают производительность резьбошлифования за счет снижения припуска и уменьшения его неравномерности. Дальнейшее повышение производительности осуществляют путем сокращения непроизводительных перемещений инструмента. Для этого возможно использование способа, реализованного в устройстве для ограничения перемещений шлифовального круга.

Принцип действия устройства заключается в том, что перебеги

шлифовального круга ограничиваются по сигналу преобразователя мощности шлифования [А. с. 812545 (СССР)].

Высокая трудоемкость контроля и сложность существующих измерительных машин затрудняют проведение контроля всех заготовок. Поэтому для определения коэффициента неравномерности для каждой заготовки винта можно использовать способ шлифования резьбы [А. с. 704773 (СССР)].

Для выявления неравномерности припуска устанавливают влияние накопленной погрешности шага резьбы на величину мощности шлифования. Поэтому перед обработкой шлифовальный круг настраивают известным способом симметрично относительно обрабатываемого профиля резьбы в середине резьбовой части изделия до касания с этим профилем.

При данной настройке производят проход резьбошлифования с постоянной скоростью вращения заготовки и измеряют на этом проходе мощность шлифования как разность между активной мощностью, потребляемой электродвигателем привода шлифовального круга в режиме работы, и мощностью вспомогательного хода.

Оценку влияния накопленной погрешности шага резьбы на величину мощности шлифования производили на станке МВ127. В качестве заготовок использовали ходовые винты с диаметром $d = 63$ мм, профилем радиусом $r_0 = 3,12$ мм и твердостью резьбовой поверхности $HRC_9 = 59-61$. Шлифование производили кругом 24A16M3K8 при постоянной скорости детали $v = 0,03$ м/с. Мощность шлифования определяли с помощью преобразователя мощности со встроенным блоком вычета мощности вспомогательного хода. Величину коэффициента неравномерности рассчитывали по результатам контроля накопленной погрешности шага резьбы заготовки на специальной измерительной машине МС-14К.

Полученные результаты свидетельствуют о закономерном характере изменения мощности шлифования N и коэффициента неравномерности K_p на настроичном ходе в зависимости от величины накопленной погрешности шага резьбы заготовки. Анализ характера изменения этих величин позволяет предложить формулу для определения зависимости между ними:

$$K_p = K_4 N + 1,$$

где K_4 — коэффициент пропорциональности; $K_4 = 0,020 \div 0,025$.

Контроль шлифовочных дефектов. Существующие методы контроля шлифованных поверхностей подразделяются на разрушающие и неразрушающие. Структуру отожженной и закаленной стали исследуют на металлографическом микроскопе, для чего изготавливают микрошлифы. Исследуемую поверхность тщательно шлифуют, полируют до зеркального блеска и выявляют структуру травлением в 3—5 %-ном растворе азотной кислоты в этиловом спирте. Количественную оценку глубины распространения структурных изменений и распределения микротвердости в поверхностном слое производят на приборе ПМТ-3.

В частных случаях упругой и пластической деформации образцов с однородной структурой распределение микротвердости характеризует напряжения в предположении единой кривой твердость — интенсивность напряжений.

Наиболее перспективными для применения в производственных условиях являются методы неразрушающего контроля. Контроль нарушения сплошности поверхности осуществляют капиллярной и магнитной дефектоскопией.

При цветной и люминесцентной капиллярной дефектоскопии осуществляют следующие операции: очищают и смачивают поверхности, заполняют полости проникающей жидкостью, удаляют проникающую жидкость с поверхности, наносят проявитель, осматривают деталь при обычном (цветной метод) или ультрафиолетовом (люминесцентный метод) освещении, удаляют остатки дефектоскопических компонентов с поверхности годных деталей.

Дефектоскопические жидкости высокотоксичны, вследствие чего применение метода ограничено. В цеховых условиях детали из ферромагнитных материалов обычно контролируют магнитопорошковым методом. Он основан на проявлении магнитных полей рассеяния в районе дефекта с помощью ферромагнитных частиц. Для контроля деталь намагничивают, поливают жидкостью, в которой находятся ферромагнитные частицы во взвешенном состоянии, и снимают магнитное поле. Наличие магнитной индукции приводит к образованию в районе дефектов магнитного поля, удерживающего ферромагнитные частицы. Нарушение сплошности выявляют визуально.

Методы контроля сплошности используют для разбраковки деталей. Они не позволяют предотвращать дефекты, так как не дают достаточной информации о характере и величине изменений поверхностного слоя в процессе обработки детали.

Контроль методами вихревых токов позволяет производить проверку нескольких параметров изделия. Особенностями этого метода являются контроль материала в слое небольшой толщины, отсутствие контакта преобразователя с изделием, простота автоматизации измерения и быстродействие, обусловленные электрической природой сигнала, высокая производительность контроля, возможность контроля движущейся поверхности.

Метод вихревых токов может быть применен для сортировки стали по маркам, контроля качества термообработки стали, определения остаточных напряжений, а также для выявления шлифовочных дефектов. Существующие приборы позволяют оценивать глубину прижогов равной площади на деталях сравнительно простой формы — плоской либо цилиндрической.

Для контроля резьбы полукруглого профиля в ОПИ спроектирован и изготовлен прибор неразрушающего контроля ПНК-2.

Результаты контроля этим прибором приведены ниже.

Показания ПНК-2, деления . .	+9,1	-59,4	+14,6	-80,3
Глубина зоны отпуска h , мм . .	0,28	0,36	0,25	0,35

Применение этого прибора позволяет значительно улучшить качество контроля поверхностного слоя резьбы ходовых винтов качения, делает контроль более оперативным и ликвидирует расход металла, неизбежный при разрушающих методах контроля.

ТЕХНОЛОГИЯ ПРОИЗВОДСТВА ГАЕК И КОРПУСОВ

Материал и выбор заготовки для изготовления гаек и корпусов. Гайки передач являются ответственными деталями, которые подвергаются в процессе эксплуатации высоким нагрузкам. Функционально конструктивные элементы гайки предназначены для регулирования и обеспечения в процессе эксплуатации заданного предварительного натяга, размещения вкладышей и взаимодействия с шариками, которые, в свою очередь, упруго контактируют с резьбовой поверхностью винта.

Для обеспечения функционального назначения при изготовлении гаек применяют стали, упрочняемые объемной закалкой или химико-термическими методами. При объемной закалке применяют стали 9ХС и ШХ15, примерный химический состав которых приведен в табл. 11.

11. Примерный химический состав, %, объемно-закаливаемой стали для изготовления гаек

Сталь	С	Si	Mn	Cr	Ni	Cu
9ХС	0,85—0,95	1,20—1,60	0,30—0,60	0,05—1,25	—	—
ШХ15	0,95—1,05	0,17—0,37	0,20—0,40	1,30—1,65	0,30	0,25

Инструментальную сталь повышенной прокаливаемости 9ХС применяют для изготовления гаек без буртов в передачах с nominalным диаметром 20—100 мм. В качестве заготовок применяют горячекатаный прокат. Это обусловлено тем, что изготовление труб из стали 9ХС промышленностью не освоено, а штамповка заготовок затруднена чувствительностью к обезуглероживанию и возникновению скрытых трещин. Поэтому сталь 9ХС рекомендуют использовать в качестве заготовок для изготовления гаек в условиях единичного и серийного производства.

В качестве заготовки из стали ШХ15 используют трубу, поковку или горячую штамповку. Ковку и штамповку производят в нагретом состоянии. Оптимальный температурный интервал определен по диаграмме состояния с учетом комплекса лабораторных исследований, проведенных для определения свойств металла при нагреве и его строения в зависимости от времени пребывания при высоких температурах, и заключен в пределах 1180—830 °C.

Обрабатываемость заготовок из сталей ШХ15 и 9ХС лезвийным и абразивным инструментом примерно одинакова. Для изготовле-

ния гаек используют также стали типа 15Х, 20Х, 12Х2Н4А, 20ХН2М и др. За рубежом для этой цели используют аналогичные стали, в частности СМ21, СМ22, СМ23, А118620. Примерный химический состав этих сталей приведен в табл. 12.

12. Примерный химический состав, %, цементируемых сталей для изготовления гаек передачи ВГК

Сталь	C	Si	Mn	Cr	Ni	Mo
15Х	0,12—0,18	0,17—0,37	0,40—0,70	0,70—1,00	—	—
20Х	0,17—0,23	0,17—0,37	0,50—0,80	0,70—1,00	—	—
12Х2Н4А	0,09—0,16	0,17—0,37	0,30—0,60	0,60—0,80	2,75—3,15	—
20ХН2М	0,15—0,22	0,17—0,37	0,40—0,70	0,40—0,60	1,60—2,00	0,20—0,30
СМ21	0,13—0,18	0,15—0,35	0,60—0,85	0,80—1,20	—	0,15—0,30
СМ22	0,18—0,23	0,15—0,35	0,60—0,85	0,90—1,20	—	0,15—0,30
СМ23	0,17—0,23	0,15—0,35	0,40—0,70	0,40—0,65	1,60—2,00	0,15—0,30
А118620	0,18—0,23	0,20—0,35	0,70—0,90	0,40—0,60	0,40—0,70	0,15—0,25

Материал для гаек выбирают исходя из нагружочной способности и конструктивных особенностей гайки. При этом целесообразность использования прутков, труб или штамповок определяют экономическим расчетом в зависимости от типа производства.

Корпуса в зависимости от конструкции передачи и станка изготавливают различной формы. Преобладающими являются цилиндрическая форма с фланцем и призматическая форма корпуса. В отдельных случаях корпуса снажают посадочными местами для подшипников, литыми бронзовыми зубчатыми венцами или выполняют в виде корпусной детали станка.

В качестве материала для корпуса в зависимости от его конструктивных особенностей выбирают либо сталь 45, 45Л, либо серый, высокопрочный или ковкий чугун. Для изготовления цилиндрических корпусов с фланцами используют заготовки в виде прутков, штамповок и отливок.

Корпуса призматической формы изготавливают из сортового профилей и поковок. Экономическую целесообразность использования штамповок и отливок определяют с учетом объема партии, снижения производительности при течении по корке и необходимости устранения раковин, вскрытых в процессе механической обработки литых заготовок.

Токарная и фрезерная обработка. Токарную обработку гаек и корпусов производят в три этапа и подразделяют на черновую, получистовую и чистовую. Черновое тение применяют для максимального удаления припуска. Получистовую обработку используют в качестве подготовительной операции для чистового течения. Операцию чистового течения выполняют на корпусах в качестве

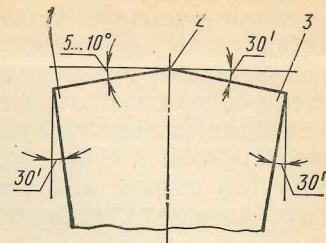
Рис. 32. Геометрические параметры резца для чистового растачивания корпуса

отделочной, а на гайках — для подготовки базы для последующего фрезерования окон под вкладыши.

Токарную черновую и получистовую обработку выполняют на универсальных, револьверных и многошпиндельных токарных станках соответственно для условий единичного, мелкосерийного и крупносерийного производства. Револьверные станки 1425 используют для обработки гаек, а станки 1П365 — для обработки корпусов. Обработку гаек из прутков и труб производят на горизонтальных многошпиндельных токарных полуавтоматах 1265, 1290. Штучные заготовки для гаек и корпусов обрабатывают на горизонтальных и вертикальных многошпиндельных токарных полуавтоматах соответственно 1265П и 1К282. Получистовую обработку корпусов в условиях мелкосерийного производства целесообразно выполнять на токарных станках с ЧПУ 16К20РФЗ, снабженных револьверной головкой.

В качестве инструмента для чернового и получистового точения применяют резцы со сменными пластинами из твердого сплава Т15К6. Напыление пластин нитридом титана на установке типа «Булат 3Т» увеличивает стойкость в 1,2—1,5 раза. Для чистового растачивания корпусов используют специальные резцы с напаянными пластинами из твердого сплава Т5К10 (рис. 32). Соосность двух отверстий под гайки и перпендикулярность опорных буртов корпуса обеспечивают растачивание поверхностей отверстий без переустановки на режимах алмазного точения. При этом цилиндрические посадочные отверстия обрабатывают режущей вершиной 2, правый и левый торцы — соответственно режущими вершинами 1 и 3. В качестве отделочной операции, предназначено для повышения жесткости стыков передачи, целесообразно использовать алмазное выглаживание, которое выполняют на токарных станках.

Предварительную обработку резьбы в гайках производят на токарных станках различными методами. Основным из этих методов являются послойное удаление припуска при многопроходном течении, при котором вращается деталь, а резец перемещается вдоль оси с подачей, равной шагу резьбы, и вихревое нарезание за один рабочий ход, при котором вращение резца обеспечивает скорость резания. В зависимости от принятого метода обработки выбирают оборудование. Для многопроходного течения резьбы используют универсальные станки 16К20, станки с программным управлением 16К20РФЗ и специальные резьботокарные станки 1Б922Г. Последний станок обеспечивает точность шага резьбы на всей длине гайки в пределах 5 мкм с параметрами шероховатости резьбы $Ra = 1,25 \div 0,63$ мкм.



На поверхности резьбы, обработанной вихревым методом, заметны следы дробленности и шероховатость несколько выше, чем в предыдущем случае, однако для предварительной обработки этот метод более целесообразен благодаря высокой производительности и простоте перенастройки станка. Для осуществления вихревой нарезки резьбы в гайке модернизируют универсальный токарно-винторезный станок, для чего устанавливают на суппорт специально изготовленную вихревую головку.

Припуски на токарную обработку гаек из сталей 9ХС, ШХ15 и корпусов при изготовлении приведены в табл. 13.

13. Припуски на токарную обработку гаек и корпусов передач ВГК, мм

Обрабатываемая поверхность	Получистовое тончение		Чистовое тончение	
	Припуск на диаметр (дилину)	Допуск	Припуск на диаметр (дилину)	Допуск
<i>Гайка</i>				
Наружная цилиндрическая	1,5—2,0	— (0,3—0,5)	0,5—1,0	— (0,1—0,2)
Отверстие	1,5—2,0	+ (0,3—0,5)	0,4—0,5	— 0,1
Торцовая	1,5—2,0	± (0,2—0,4)	0,2—0,3	— (0,1—0,2)
<i>Корпус</i>				
Отверстие	2,0—2,5	+ (0,5—0,7)	0,1—0,2	+ 0,05
Торцовая	2,0—2,5	± (0,2—0,4)	0,1—0,2	± 0,05

При нарезании резьбы в гайках на последующую обработку оставляют припуск по профилю 0,1—0,15 мм и по наружному диаметру 0,4—0,5 мм.

Режимы обработки выбирают в соответствии с общемашиностроительными нормативами режимов резания для технического нормирования работ на металлорежущих станках. В качестве СОЖ используют эмульсию, а при вихревом нарезании резьбы — сжатый воздух.

Форму окна в гайке определяет конструкция вкладыша. Окно выполняют в виде либо одного или двух цилиндрических отверстий, либо паза, ограниченного двумя цилиндрическими поверхностями.

При небольшом объеме производства окна в гайках выполняют на координатно-расточных станках 2431, 2450 и станках с ЧПУ 6Р13РФ3. В условиях крупносерийного производства используют специальные станки ОП-63, изготавляемые ОЗПС.

Станок ОП-63 разработан на базе станка 6Б76ПФ2 и снабжен поворотным столом с горизонтальной осью, на шпинделе которого устанавливают обрабатываемую заготовку, а также инструментальным магазином на шесть инструментов. Поворот стола на необходимое число делений и смена инструмента производятся автоматически по программе.

Техническая характеристика станка ОП-63

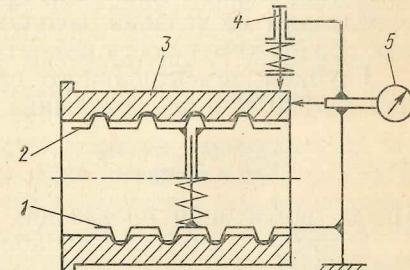
Размеры стола, мм	250×630
Перемещение стола, мм:	
продольное	400
вертикальное	400
Наибольшее перемещение шпиндельной головки, мм	250
Частота вращения шпинделя, об/мин	400—2000
Пределы продольных, поперечных и вертикальных подач, мм/мин	2,5—1600
Величина ускоренного хода, мм/мин	3000
Емкость инструментального магазина, шт.	6
Система ЧПУ	250
Диаметр рабочей поверхности поворотного стола, мм	2, 3, 4, 6, 8, 12
Число делений стола	$\pm 1'$
Точность поворота стола	5
Максимальная масса обрабатываемой гайки, кг	2,2
Мощность привода главного движения, кВт	

Схема обработки зависит от формы окна и при наиболее технологичной, цилиндрической форме включает сверление и растачивание.

Для изготовления окон в виде паза, ограниченного цилиндрическими поверхностями, применяют маятниковую или контурную схемы фрезерования. Положение окна относительно резьбы регламентировано, и смещение центра окна относительно центра выступа резьбы не должно превышать $\pm 0,03$ мм. Поэтому для ориентации окна относительно резьбы используют различные технологические приемы и специальные приспособления. Одним из технологических приемов является нанесение разметочной риски, указывающей положение захода резьбы с последующей ориентацией гайки на фрезерной операции с учетом положения риски. Разметочную риску наносят при нарезании резьбы или с помощью приспособления, разработанного на ОЗПС (рис. 33). Приспособление состоит из неподвижного 1 и подвижного 2 базовых элементов, упруго контактирующих с профилем гайки 3. На неподвижном элементе закреплены индикатор часового типа 5 и устройство 4 для нанесения разметочной риски. При разметке подвижный 2 базовый элемент отводят, устанавливают гайку 3 по индикатору 5 и наносят риску с помощью устройства 4. Погрешность разметки зависит от точности установки гайки в осевом направлении и не превышает 0,01 мм.

Приспособления для базирования гайки относительно резьбы применяют довольно редко вследствие несовершенства конструкции.

Рис. 33. Схема приспособления для разметки гаек под фрезерование окон



Обработку окон производят инструментом из быстрорежущей стали при обильном охлаждении эмульсией. Напыление инструмента нитридом титана значительно повышает размерную стойкость инструмента.

Термическая обработка гаек. В зависимости от принятого материала проводят термическую или химико-термическую обработку гаек. Термическая обработка сталей 9ХС и ШХ15 состоит из отжига, закалки и отпуска (табл. 14). Отжиг производят для сни-

14. Режимы термической обработки сталей 9ХС и ШХ15

Термическая обработка	Сталь 9ХС		Сталь ШХ15	
	Температура нагрева, °C	Условия охлаждения	Температура нагрева, °C	Условия охлаждения
Отжиг	790—810	С печью, 30° С/ч	770—790	С печью, 30° С/ч
Закалка	860—880	В масле	830—860	В масле
Отпуск	150—200	На воздухе	130—220	На воздухе

жения твердости, улучшения обрабатываемости резанием и снятия остаточных напряжений после обработки давлением. Твердость сталей 9ХС и ШХ15 после отпуска составляет соответственно HV 187—241 и HV 178—207. Для перевода неравновесной структуры в более равновесную после закалки гаек производят низкотемпературный отпуск.

В результате проведенной обработки образуется структура отпущеного мартенсита с твердостью HRC_9 59—63.

Химико-термическая обработка изменяет структуру и химический состав поверхностного слоя, что позволяет в широких пределах изменять свойства материала. Цементация является процессом диффузионного насыщения углеродом поверхностного слоя и характеризуется неравномерным распределением углерода по глубине поверхностного слоя. Для оценки используют понятие эффективной глубины слоя, которая определяется глубиной диффузионной зоны с определенной твердостью. При воздействии на деталь высоких контактных нагрузок эту твердость принимают равной $HV=6000—7000$ МПа. Глубину цементованного слоя для гаек определяют из условий эксплуатации и регулируют путем изменения продолжительности цементации.

Глубина цементованного слоя зависит от времени выдержки при $T=930^{\circ}\text{C}$ и использовании керосина в качестве карбюризатора:

Глубина слоя, мм	1,2	1,5	1,9	
Время выдержки, ч	8	10	12	

После цементации производят закалку и отпуск (табл. 15).

Химико-термическая обработка гаек из сталей 20Х и 12ХН3А увеличивает деформацию по сравнению с гайками из стали 9ХС.

15. Режимы химико-термической обработки сталей 20Х, 18ХГТ, 12ХН3А

Операция	Температура нагрева, °C	Охлаждающая среда
Цементация	920—850	Воздух
Закалка	780—820	Масло
Отпуск	180—200	Воздух

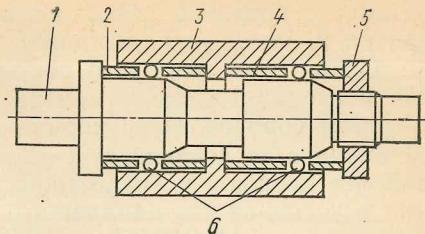


Рис. 34. Оправка для шлифования корпусов

Поэтому на гайках с условным диаметром резьбы 63 мм увеличивают припуск по наружной цилиндрической поверхности на 0,3 мм и соответственно уменьшают по внутренним поверхностям. Цементуемые стали не рекомендуется применять для гаек, в которых запрессовывают вкладыши, так как при их установке наблюдается выкрашивание цементованных участков в зоне, прилегающей к окну гайки.

Чистовая обработка гаек. Чистовая механическая обработка гаек включает операции шлифования внутренней и наружной цилиндрической поверхностей, торцов, резьбы и зубьев. Для стабилизации размеров во времени перед чистовой обработкой проводят старение.

Все операции, кроме шлифования резьбы, выполняют на универсальном оборудовании.

Станок	Обрабатываемая поверхность
3К227	Отверстие
3М151	Торцы и наружные поверхности
МВ125С5, МВ151	Резьбовая
5В832	Зубчатая

Для установки гаек в серийном производстве используют различные виды оправок. Предварительное шлифование наружной цилиндрической поверхности и чистовое шлифование торцов осуществляют на цанговой оправке. Чистовое шлифование наружной цилиндрической поверхности выполняют на плавающей оправке с базированием по торцам гайки. При этом параллельность торцов и перпендикулярность их к наружной цилиндрической поверхности выдерживают в пределах 3—5 мкм. При зубошлифовании устанавливают две гайки на оправку и базируют по их наружной цилиндрической поверхности элементами, выполненными в виде чашки.

Шлифование базовых поверхностей корпуса производят на шариковой оправке, конструкция которой разработана на ОЗПС (рис. 34). На оправке 1 установлены сепараторы 2 и 4 с шариками 6 и зажимная гайка 5. При установке корпуса 3 снимают сепаратор 4, а сепаратор 2 сдвигают вправо до выхода шариков из

контакта с конусной поверхностью. Корпус устанавливают на сепаратор 2, затем устанавливают сепаратор 4 и зажимают его гайками 5. При этом шарики 6 перемещаются по конусным поверхностям и входят в упругий контакт с цилиндрической поверхностью отверстий корпуса. Погрешность базирования корпуса на шариковой оправке не превышает 1—3 мкм. Резьбошлифование является наиболее сложной и трудоемкой операцией. Этую операцию выполняют в условиях как единичного, так и крупносерийного производства на станках MB125C5 и MB151.

Техническая характеристика резьбошлифовального станка MB151

Наибольшая длина устанавливаемой детали, мм	190
Диаметры шлифуемых резьб, мм:	
наименьший	25
наибольший	100
Наибольшая длина обрабатываемой резьбы, мм	115
Шаги обрабатываемой резьбы, мм	5, 6, 10, 12, 20
Пределы частоты вращения шпинделя изделия, об/мин:	
рабочий ход	0,8—60
ускоренное перемещение (в зависимости от шага)	100, 50, 25
Наибольшая частота вращения круга, об/мин	40 000
Наибольший ход стола, мм	210
Наибольшая величина перемещения шлифовальной бабки от механизма поперечной подачи, мм	50

Станок MB151 отличается простой кинематической схемой, высокой точностью и предназначен для шлифования резьбы класса точности А.

Техническая характеристика резьбошлифовального станка MB125C5

Наибольшая длина шлифуемой резьбы, мм	130
Наибольшая величина поперечного перемещения шлифовальной бабки, мм	50
Частота вращения шпинделя изделия, об/мин:	
рабочий ход	0,8—40
ускоренное перемещение	40
Наибольшая частота вращения круга, об/мин	21 600
Угол подъема винтовой линии для резьб, градус:	
левой	10
правой	8
Наибольшее продольное перемещение стола, мм	210

Для обеспечения требуемых эксплуатационных характеристик передачи точность расположения резьбы по отношению к другим элементам гайки регламентирована. При резьбошлифовании обеспечивают соосность резьбы и наружной цилиндрической поверхности в пределах 5 мкм, перпендикулярность опорному торцу в пределах 5 мкм, совмещение середины выступа резьбы с осью окна в пределах $\pm (0,03—0,05)$ мм.

В зависимости от конструкции гайки, используемого оборудования и типа производства применяют различные способы и соот-

ветствующие приспособления для базирования гаек на резьбошлифовальном станке. Гайки, выполненные в виде цилиндрической втулки, устанавливают в четырехкулачковом патроне и выставляют по наружному диаметру и торцу с помощью индикатора с точностью 5 мкм. При шлифовании в патроне кулачки деформируют гайку, и точность резьбовой поверхности понижается. Для устранения этого гайки с зубчатым венцом или фланцем устанавливают на планшайбе, прижимают прихватами за венец или фланец и выставляют по индикатору. В крупносерийном производстве целесообразно применять шариковую втулку конструкции УКРНИИСИП. В этой конструкции гайку 1 базируют по наружной цилиндрической поверхности с помощью шариков 2 и прижимают прихватом 3 по торцам (рис. 35). При этом отпадает необходимость выставления по индикатору и погрешность базирования не превышает 3—5 мкм.

При повышенных требованиях к точности взаимного расположения резьбы и окна под вкладыш настройку производят операторы высокой квалификации вручную при помощи корректора осевого смещения шлифовального круга.

Шлифование резьбы на гайках производят глубинным или скоростным методом. Поперечная подача при рабочем проходе составляет 0,05—0,10 и 0,02—0,05 мм, частота вращения 3—10 и 25—40 об/мин соответственно для глубинного и скоростного шлифования резьбы гаек передач ВГК (см. приложение 1).

Контроль качества изготовления гаек. Точность изготовления гаек передач ВГК контролируют универсальными и специальными средствами контроля. Точность исполнения и взаимного расположения цилиндрической, торцовой и зубчатой поверхностей контролируют стандартными средствами. Для контроля точности исполнения и взаимного расположения геометрических элементов окон под вкладыш и резьбы применяют специальные способы и устройства. Контролируют угол наклона окон к оси гайки, взаимное расположение окон по периметру, шаг окон в направлении оси гайки, несовпадение центра среднего окна с серединой выступа резьбы, а также внутришаговую и наклонную погрешность шага, наружный диаметр и профиль резьбы.

Погрешность первых трех из указанных параметров является величиной постоянной и зависит от точности координатно-расточного станка и базирующего приспособления соответственно для мелкосерийного и крупносерийного производства. Поэтому контроль проводят при настройке и в арбитражных случаях с исполь-

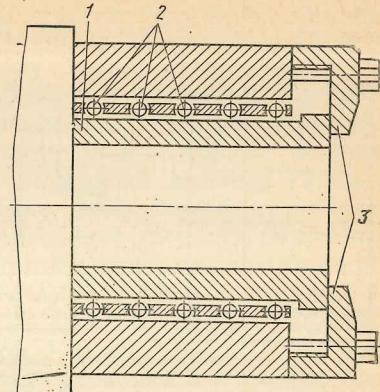


Рис. 35. Шариковая втулка

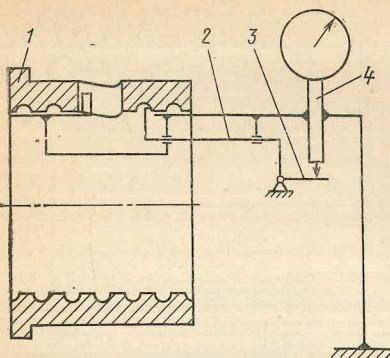


Рис. 36. Приспособление для контроля отклонения оси окна и середины выступа резьбы

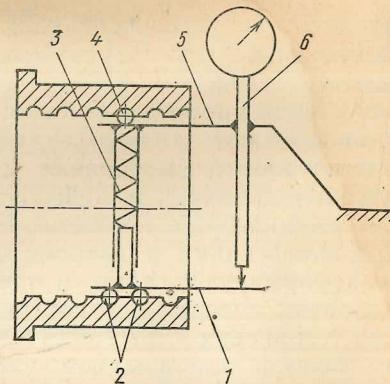


Рис. 37. Приспособление для контроля диаметра резьбы в гайке

зованием универсального измерительного микроскопа УИМ-21 с измерительной бабкой ИБ-21, а также делительной головки ОДГ-10 и индикаторных головок.

Величина отклонения оси центрального окна от середины выступа резьбы зависит от квалификации рабочего, режимов резания, используемого инструмента и изменяется в партии гаек в широких пределах. Поэтому осуществляют 100 %-ный контроль. В условиях единичного и мелкосерийного производства величину отклонения определяют как половину разности наименьшего расстояния между образующими окна и ближайшими вершинами резьбы. Величину этого расстояния измеряют универсальными средствами. В крупносерийном производстве величину отклонения контролируют специальными устройствами 3138М, разработанными Особым конструкторским бюро средств автоматизации (ОКБ СА) и выпускаемыми заводом «Калибр».

При контроле гайку 1 базируют по внутренней цилиндрической поверхности и среднему окну, а измерительный наконечник 2, соединенный с помощью рычага 3 с индикаторной головкой 4, контактирует с профилем резьбы (рис. 36). Для определения величины несовпадения гайку устанавливают на приспособление дважды, разворачивая на 180°, вычисляют разность показаний индикаторной головки и делят ее пополам. Радиус профиля резьбы в мелкосерийном производстве измеряют методом хорд на универсальном измерительном микроскопе УИМ21. Для непосредственного контроля из одной гайки вырезают тонкий темплет в осевой плоскости. Косвенно радиус профиля контролируют по слепку, например из парафина, или по отпечатку профиля шлифованного круга на тонком стальном шаблоне.

Величину внутришаговой и накопленной погрешности шага резьбы гайки контролируют на трехкоординатной измерительной машине MU-214 фирмы SIP (Швейцария) с использованием точ-

ной делительной головки и измерительного наконечника, контактирующего с профилем резьбы на участках, по которым катятся шарики.

Наружный диаметр резьбы контролируют рычажной скобой и шариком, диаметр которого равен 0,96 диаметра профиля резьбы. Шарик устанавливают в резьбовую канавку и измеряют им толщину стенки гайки. Затем измеряют наружный диаметр гайки и вычисляют наружный диаметр резьбы. Этот способ отличается простотой и низкой точностью. Для повышения точности наружный диаметр резьбы контролируют при помощи специального прибора модели 4384 (рис. 37), разработанного в ОКБ СА и выпускаемого заводом «Калибр». Прибор состоит из нижней опоры 1 с двумя базовыми элементами в виде шариков 2, расположенных на расстоянии, кратном шагу резьбы, верхнего элемента 5 с измерительным наконечником в виде шарика 4, механизма подвода и отвода измерительного наконечника 3 и измерительной головки 6 с ценой деления 1 мкм. Погрешность показаний прибора не превышает 3—4 мкм.

ТИПОВЫЕ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ ПРОЦЕССЫ И ОБОРУДОВАНИЕ

Последовательность выполнения операций технологического процесса зависит от типа производства.

Типовой маршрутный технологический процесс и оборудование для изготовления гаек

Операция	Производство	
	мелкосерийное	серийное и массовое
Токарная: черновая получистовая чистовая	16К20, 1425 16К20, 1425 16К20, 16К20РФ3	1265, 1К288 1265, 1К288 16К20РФ3
Координатно-расточная	2450	—
Резьботокарная	16К20, 16К20РФ3	1Б922Г (на базе) 16К20 (с вихревой головкой) 692М, ОП-63
Фрезерная	—	3К227
Термическая (цементация и закалка, закалка)	3М151	3М151
Внутришлифовальная	MB125, MB151	MB125
Круглошлифовальная	MB125, MB151	MB151
Резьбошлифовальная	BB832	5B832
Термическая (старение)	3М151	3М151
Круглошлифовальная	MB125, MB151	MB151
Резьбошлифовальная	BB832	5B832
Зубошлифовальная	2Р135Ф2	2Р135Ф2
Сверлильная	5Д14С	5Д14С
Зубодолбежная	3Д75Б	3Д75Б
Плоскошлифовальная		

**Технологические операции и оборудование
для изготовления цилиндрических корпусов**

Токарная:	
черновая	1П365, 16К20РФ3
получистовая	16К20РФ3
Фрезерная	6Р13
Круглошлифовальная	3М151
Токарная чистовая	16К20
Сверлильная	2Р135Ф2
Зубодолбечная	5Д14С

**Технологические операции и оборудование
для изготовления призматических корпусов**

Фрезерная	6Р18
Токарная:	
черновая	1П365, 16К20РФ3
получистовая	16К20РФ3
чистовая	16К20

ИЗГОТОВЛЕНИЕ ВКЛАДЫШЕЙ

Применяемый материал и виды заготовок. В серийном производстве вкладыши изготавливают методами механической обработки из сталей 9ХС и 40Х. В качестве заготовок используют сортовой прокат и поковки. Посадочные поверхности обрабатывают на групповой заготовке. В крупносерийном производстве заготовки получают методами порошковой металлургии из шихты, включающей железный порошок марки ПЖЗМ и добавочные компоненты. Перед составлением шихты визуально контролируют компоненты на отсутствие коррозии и посторонних примесей. Затем порошок просеивают на вибросите. Все компоненты взвешивают. В смеситель засыпают компоненты в следующей пропорции, %: железный порошок ПЖЗМ — 97,7; углерод технический ПМ75 — 0,6; стеарат цинка — 0,2; феррохром ФХ050 — 15.

Для улучшения перемешивания засыпают остальные шари и пружины в количестве 10—12 % от массы шихты. Шихту смешивают до равномерного распределения компонентов по объему и контролируют содержание углерода в трех различных зонах смесителя. Отклонение содержания углерода не должно превышать $\pm 5\%$. Содержание углерода определяют методом сжигания навески в кислороде. При положительном результате контроля из замеса изготавливают три — пять вкладышей, из которых берут стружку для контроля содержания углерода. При отрицательном результате дополнительно вводят тот или иной компонент, перемешивают шихту, изготавливают следующие три — пять вкладышей, стружку от которых проверяют на содержание углерода.

Перспективным направлением в производстве передач ВГК является применение вкладышей из пластических масс. Упругость и высокие антифрикционные свойства этих материалов исключают пригонку вкладыша при сборке и повышают плавность работы

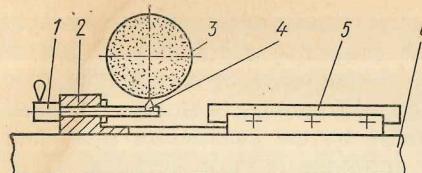


Рис. 38. Приспособление для шлифования цилиндрической поверхности заготовки под вкладыши

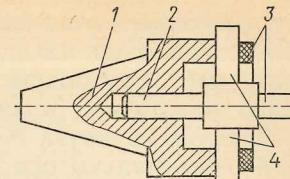


Рис. 39. Оправка для обтачивания вкладышей

передачи. Для производства вкладышей можно применять ряд конструкционных пластических масс, в частности первичный капрон. Этот материал представляет собой полярный кристаллический полиамид средней прочности с высокими антифрикционными свойствами и стойкостью к воздействию керосина, бензина, минеральных и органических масел. Применяется при изготовлении зубчатых колес, подшипников скольжения и сепараторов подшипников качения.

Технология производства вкладышей. Вкладыши передачи ВГК являются ответственными деталями, и точность их изготовления влияет на такие эксплуатационные характеристики передачи, как осевая жесткость и момент вспомогательного хода. Вкладыши имеют небольшие габаритные размеры и сложную форму. Отсутствие развитых базовых поверхностей затрудняет обработку вкладышей, и для получения требуемой точности применяют заготовки с технологическими прибылями или групповые заготовки. Посадочные поверхности обрабатывают на групповой заготовке, предназначеннной для получения 10—12 вкладышей. Боковые поверхности заготовки фрезеруют на вертикально-фрезерном станке с припуском 0,3—0,5 мм под шлифование.

В зависимости от типа производства для установки заготовок применяют станочные тиски или многоместные приспособления. Цилиндрические посадочные поверхности обрабатывают предварительно на горизонтально-фрезерном станке полукруглыми вогнутыми фрезами, изготовленными из быстрорежущих сталей Р18 и Р6М5. Для обеспечения припуска на шлифование фрезу затачивают по полукруглой вогнутой поверхности, выдерживая величину радиуса, на 0,15—0,2 мм превышающую номинальное значение. Чистовую обработку боковых посадочных поверхностей осуществляют на плоскошлифовальном станке, оснащенном магнитной плитой. При этом одновременно шлифуют 20—30 групповых заготовок.

Чистовое шлифование цилиндрических посадочных поверхностей производят на плоскошлифовальном станке в специальном приспособлении (рис. 38). Это приспособление предназначено для установки заготовки, правки полукруглой вогнутой поверхности шлифовального круга и точного совмещения цилиндрических и боковых посадочных поверхностей. Устройство состоит из корпу-

са 2, правящего устройства 1 и алмазного резца 4. Устройство устанавливают на магнитном столе станка 6 с точностью 0,01 мм на 300 мм. Групповую заготовку 5 закрепляют в корпусе с помощью зажимного приспособления. Величину радиуса профиля шлифовального круга 3 настраивают путем смещения алмазного резца относительно оси поворота правящего устройства 1. Перед началом шлифования круг подводят к алмазному резцу и правят. Затем ограничивают ход шлифовального круга конечными выключателями, установленными с учетом длины заготовки и величины перебегов, и шлифуют заготовку. Последующую правку проводят по мере изнашивания шлифовального круга. Затем групповую заготовку разрезают на сдвоенные заготовки на горизонтально-фрезерном станке отрезными фрезами. При этом групповые заготовки устанавливают в тиски со специальными губками, которые выполняют в виде пластин с прорезями для прохода фрезы, или в многоместное приспособление. Размеры сдвоенной заготовки устанавливают с учетом величины припуска на обтачивание, растачивание и разрезание.

В единичном и мелкосерийном производстве канал возврата шариков во вкладыше обрабатывают на координатно-расточных или фрезерных станках с контурной системой ЧПУ. В связи с высокой трудоемкостью обработки на координатно-расточном станке и расширением парка станков с ЧПУ канал возврата шариков во вкладыше целесообразно фрезеровать на станках с ЧПУ. При составлении программы обработки следует учитывать возникновение дополнительной погрешности при реверсировании перемещения стола. Поэтому предпочтительной по точности является обработка за один рабочий ход.

При серийном производстве перед фрезерованием канала возврата растачивают цилиндрические поверхности на сдвоенной заготовке в специальной оправке, разработанной на ОЗПС (рис. 39).

Оправка состоит из корпуса 1 с коническим хвостовиком устанавливаемым в шпиндель токарного станка, базирующего элемента 2 и зажимов 3. В оправке выполнены пазы под углом к оси, равным углу окна под вкладыши на гайке. При растачивании устанавливают базирующий элемент 2 в оправку 1, заготовку — в пазы, которую доводят до упора в базирующий элемент 2 и закрепляют зажимами 3 сдвоенные заготовки под вкладыши 4. Затем вынимают базирующий элемент 2 и растачивают заготовки. Канал возврата фрезеруют с помощью фрез со сферической головкой на специальных полуавтоматах ОП-60, разработанных и изготовленных на ОЗПС.

Техническая характеристика станка ОП-60

Рабочая поверхность вертикального стола, мм	250×630
Перемещение стола, мм:	
продольное	400
вертикальное	400
Наибольшее перемещение горизонтальной бабки, мм	250

Расстояние от торца вертикального шпинделя до плоскости углового стола, мм:

наибольшее	480
наименьшее	30
Частота вращения вертикального шпинделя, об/мин	1340, 2050
Пределы вертикальных подач, мм/мин	8—1600
Величина вертикального ускоренного хода, мм/мин	3000

Сдвоенные заготовки разрезают на штучные на горизонтально-фрезерном станке отрезной фрезой. При этом используют тиски с накладными губками или многоместные приспособления. Наружную цилиндрическую поверхность вкладыша обтачивают на оправке, конструкция которой аналогична конструкции, показанной на рис. 39. При отсутствии оснастки штучную заготовку с фрезерованным каналом возврата запрессовывают в гайку, устанавливают в патрон токарного станка и обтачивают цилиндрические поверхности вкладыша.

В зависимости от способа крепления в окне гайки изменяется объем подгоночных работ во вкладыше при сборке. Наибольший объем подгоночных работ выполняют на запрессованных вкладышах.

Прогрессивные методы изготовления. Изготовление вкладышей с применением методов обработки резанием снижает коэффициент использования металла, увеличивает численность станочного парка, обслуживающего персонала и производственные площадки. Эти недостатки устраняются при использовании методов порошковой металлургии. Процесс изготовления включает холодное компактирование порошка и последующую обработку вкладышей с применением нагрева. Холодное компактирование производят методами импульсного формирования, одноосного или гидростатического прессования. Последующую обработку брикета выполняют с использованием методов спекания или динамического горячего прессования. При спекании брикет нагревают до температуры, равной $\frac{2}{3}$ температуры плавления, и выдерживают в вакууме или защитной атмосфере. При динамическом горячем прессовании брикет нагревают до температуры 600—1300 °C, закладывают в штамп и прессуют.

Технологический процесс изготовления вкладышей из железного порошка, разработанный Новосибирским филиалом Оргстанкинпрома, включает операции холодного и горячего прессования, нормализации, цементации, калибровки и закалки. Холодное прессование производится для получения брикета из шихты, технология получения которой изложена выше. Прочность брикета при равномерной плотности, примерно равной 5,5 г/см³, должна быть достаточной для последующего транспортирования. Брикеты прессуют на гидравлических или кривошипных прессах, снабженных нижним выталкиванием. Мощность пресса выбирают из условия получения удельного давления, равного 500 МПа. Дозирование смеси, подаваемой в пресс-форму, осуществляют вручную или с помощью загрузочного устройства. Шихту дозируют путем взвешивания

вания или измерения объема — с помощью мерки или заполнением регулируемой полости пресс-формы. После изготовления нескольких брикетов контролируют их размеры и при необходимости корректируют массу дозы. При холодном прессовании основным пластификатором является стеарат цинка, который вводят в шихту в виде порошка. После изготовления выборочно контролируют массу и размеры брикетов. Затем брикет нагревают на установке ТВЧ в течение 10—15 с до температуры 1150—1200 °С и штампуют с усилием 25 т. В результате плотность заготовки увеличивается до 7,7 г/см³. На заготовках контролируют выборочно размеры и химический состав. Содержание углерода должно быть 0,3—0,5 %.

Заготовки нормализуют при нагреве в камерной печи до температуры 940—980 °С в течение 30 мин и последующем охлаждении.

Цементацию проводят в твердом карбюризаторе с нагревом в камерной электропечи. При нагреве до 910—930 °С и выдержке в течение 6,5 ч глубина цементованного слоя составляет 0,7—1 мм.

Изготовление вкладышей из пластмассы снижает трудоемкость и металлоемкость конструкции передачи в целом. Наиболее производительным способом переработки пластических масс в изделия, в том числе во вкладыши, является литье под давлением. Этот способ используют в массовом производстве. Правильно спроектированная пресс-форма обеспечивает изготовление вкладышей с требуемой точностью при шероховатости $R_a = 0,63 \div 1,25 \text{ мкм}$.

Типовой технологический маршрут и оборудование для изготовления вкладышей методами механической обработки

Операция	Производство	
	мелкосерийное	серийное
Фрезерная (обработка плоскостей)	6Н81Г	6Н81Г
Плоскошлифовальная	3Г71	3Г71
Фрезерная (обработка цилиндрических поверхностей)	6Н81Г	6Н81Г
Токарная	—	1Е61МТ, 16К20
Фрезерная, координатно-расчетная	6Р13Ф3, 2450	ОП-60
Фрезерная отрезная	6Н81Г	6Н81Г
Токарная	16К20	1Е61МТ, 16К20

Типовой технологический маршрут и оборудование для изготовления вкладышей из железного порошка

Подготовка шихты	Смеситель СН1003.01-199-100
Холодное прессование	Пресс КД2126
Нагрев заготовки	Установка ТВЧ ЛЗ-2-64
Горячая штамповка	Пресс К9532
Нормализация	Печь Н-75
Цементация	То же
Калибровка	Пресс К9532

СБОРКА ПЕРЕДАЧ

Технология сборки. Процесс сборки передач ВГК состоит из следующих операций: 1) установки вкладышей в окна гайки (в случае необходимости — их подгонка); 2) заполнения гаек шариками; 3) проверки величины радиального и осевого зазоров между каждой из гаек и винтом; 4) регулирования предварительного натяга; 5) предварительного обкатывания передачи с целью ее приработки; 6) разборки и промывки передачи; 7) окончательной сборки передачи согласно пп. 2 и 4;

Как отмечалось выше, наиболее часто применяют передачи, в которых возврат шариков осуществляется посредством вкладыша, соединяющего два смежных витка гайки. В настоящее время вкладыши устанавливают неподвижно относительно гайки либо «плавающими», т. е. имеющими возможность малых осевых и радиальных перемещений в окне гайки. Для фиксации вкладыша при сборке передач паяют, клеят или запрессовывают. В последнем случае ввиду погрешности изготовления гаек (смещение центра окна относительно резьбы и угла наклона оси вкладыша к оси гайки) и вкладышей (погрешность фрезерования канала возврата) имеет место несовпадение канала возврата с резьбой гайки. Поэтому возникает необходимость подгонки деталей с целью плавного совмещения ручья вкладыша и резьбы гайки. Стыковку производят вручную с помощью пневматической турбинки.

Пайка вкладышей увеличивает стоимость передачи и в последнее время редко применяется на практике. В СССР и за рубежом широко применяют запрессовку вкладышей в окна гайки при сборке передач. Недостатком этого метода является увеличение напряжений в гайке, что приводит к ее короблению и возникновению трещин.

В крупносерийном и массовом производстве целесообразно применять «плавающие» вкладыши. Сборка их чрезвычайно проста. Базирование относительно резьбы гайки осуществляют с помощью выступов, контактирующих с нерабочими участками резьбы гайки, или за счет конфигурации окна и вкладыша.

Заполнение гайки шариками производят с помощью специального приспособления (рис. 40). В стакан 2 устанавливают гайку 1, которая опирается фланцем на наружный торец стакана. В гайку 1 устанавливают цилиндр 4, диаметр которого несколько меньше внутреннего диаметра резьбы винта. Цилиндр 4 удерживают на заданной высоте винтом 5.

При сборке цилиндр 4 устанавливают на такой высоте, чтобы сферическое закругление цилиндра 4 находилось на уровне первого рабочего витка гайки, после чего засыпают шарики 3 первого витка. Затем поднимают цилиндр 4 до уровня следующего витка и засыпают шарики. При этом следует предотвратить попадание шариков в нерабочую зону между двумя соседними вкладышами, так как это может привести к поломке передачи. Гайку, заполнен-

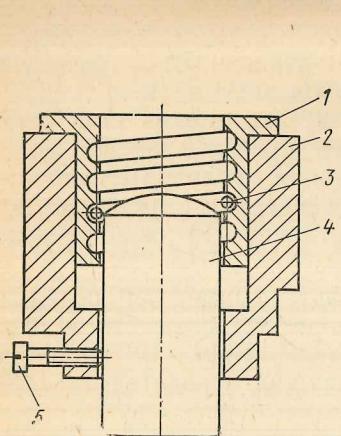


Рис. 40. Приспособление для заполнения гаек шариками

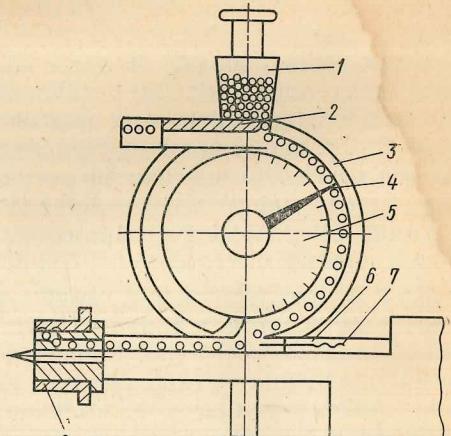


Рис. 41. Приспособление с дозирующим устройством для заполнения гаек шариками

ную шариками, перемещают на втулку, наружный диаметр которой равен внутреннему диаметру резьбы винта, а внутренний диаметр — диаметру шейки винта. Втулку устанавливают на шейку винта и навинчивают гайку с шариками.

В массовом производстве используют приспособление [А. с.349832 (СССР)] с дозирующим устройством (рис. 41), которое содержит обойму 3, выполненную в виде диска, с расположенным в верхней части бункером 1 и заслонкой 2. Внутри обоймы установлен барабан 5 с делительной шкалой и отсекателем 4. В нижней части барабана размещены сменная вставка 6 и плунжер 7, предназначенные для направления и подачи шариков в рабочий виток гайки. В бункер 1 засыпают шарики. На шкале барабана 5 устанавливают число шариков, которое помещается в одном витке. После открытия заслонки 2 обойма 3 заполняется шариками, которые поступают в промежуточный канал сменной вставки 6, а затем с помощью плунжера 7 — в рабочий виток гайки 8.

Нагрузочная способность, жесткость, долговечность и другие эксплуатационные характеристики передачи зависят от величины угла контакта шариков α , определяемого по формуле

$$\cos \alpha = 1 - \frac{d_{\text{н.г}} - d_{\text{в.в}} - 2d_{\text{ш}}}{2(r_{\text{в}} + r_{\text{г}} - d_{\text{ш}})},$$

где $d_{\text{н.г}}$ — наружный диаметр резьбы гайки; $d_{\text{в.в}}$ — внутренний диаметр резьбы винта; $r_{\text{г}}$ и $r_{\text{в}}$ — радиусы профилей резьбы гайки и винта.

Величина угла контакта однозначно взаимосвязана с величиной радиального и осевого зазоров:

$$\alpha = \arcsin \frac{2\Delta_p \Delta_0}{\Delta_p^2 + \Delta_0^2} \quad \text{или} \quad \alpha = \arccos \frac{\Delta_0^2 - \Delta_p^2}{\Delta_0^2 + \Delta_p^2},$$

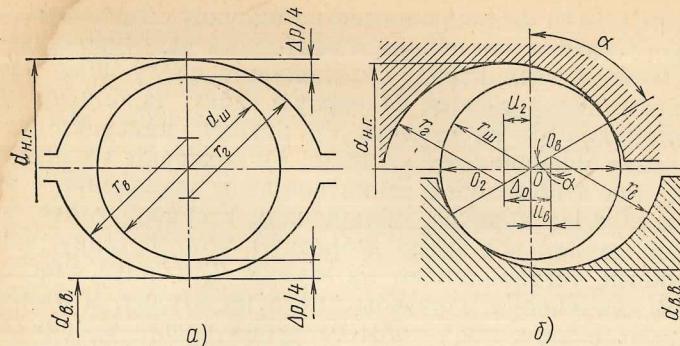


Рис. 42. К определению радиального (а) и осевого (б) зазоров передачи ВГК

где $\Delta_p = d_{\text{н.г}} - d_{\text{в.в}} - 2d_{\text{ш}}$ — радиальный зазор (рис. 42, а);

$$\Delta_0 = I_2 + I_v + 2 \sqrt{(r_{\text{г}} + r_{\text{в}} - d_{\text{ш}})^2 - \left(r_{\text{г}} + r_{\text{в}} + \frac{d_{\text{в.в}}}{2} - \frac{d_{\text{н.г}}}{2} \right)^2}$$

— осевой зазор (рис. 42, б).

Контроль зазоров осуществляют следующим образом. Винт с навинченной гайкой устанавливают на призмах в горизонтальном положении. При этом гайка под собственным весом занимает нижнее положение. По индикатору 1, стойка которого установлена неподвижно относительно винта, снимают отсчет Δ_1 (рис. 43). Затем поднимают гайку вверх усилием, в 2—3 раза превышающим ее вес, и по индикатору 1 снимают второй отсчет Δ_2 . Разность отсчетов индикатора $\Delta_2 - \Delta_1$ равна радиальному зазору Δ_p между гайкой и винтом. Для контроля осевого зазора гайку устанавливают соосно винту, установленному в горизонтальном положении, и, не вращая, смещают поочередно в крайнее левое и правое положения. Максимальное перемещение гайки, равное осевому зазору, измеряют индикатором 2.

Как отмечалось выше, передачи ВГК собирают с одной или двумя гайками. Передачи с одной гайкой находятся в станке в вертикальном положении, и натяг создается массой присоединенных узлов. Регулирование предварительного натяга в передачах с двумя гайками производят в зависимости от конструкции механизма для предварительного натяга.

Рассмотрим регулирование предварительного натяга в наиболее часто встречающейся конструкции, в которой натяг создают изменением углового положения гаек, снабженных зубчатыми венцами.

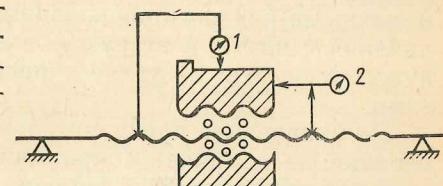


Рис. 43. Контроль радиального и осевого зазоров передачи ВГК

ми с числом зубьев, отличающимся на единицу. Для создания предварительного натяга при сборке и повторном регулировании по мере изнашивания этих передач выполняют следующие операции: 1) винт зажимают в тисках; 2) первую гайку, заполненную шариками, устанавливают на втулку; 3) втулку надевают на шейку винта, и гайку навинчивают на винт; 4) надевают на первую гайку корпус, так чтобы зубья гайки вошли в зацепление с зубьями корпуса, а сторона корпуса, обращенная к первой гайке, имела с этой гайкой одинаковое число зубьев; 5) вторую гайку, заполненную шариками, устанавливают на втулку; 6) корпус вместе с первой гайкой свинчивают с резьбы винта на втулку, и вторую гайку вставляют в него так, чтобы ее зубья вошли в зацепление с зубьями на второй стороне корпуса; 7) корпус вместе с двумя находящимися в нем гайками навинчивают на винт, при этом может оказаться, что корпус с гайками на винт не наворачивается; в этом случае их вновь свинчивают на втулку, первую гайку выводят из зацепления с корпусом, проворачивают ее в направлении навинчивания на винт на несколько зубьев, вводят в зацепление и навинчивают на винт; если при этом образуется зазор, то повторяют указанную операцию, повернув гайку в сторону свинчивания с винтом на один-два зубца до образования натяга; 8) для точного регулирования натяга свинчивают корпус с гайками на втулку, и регулируют натяг двумя гайками, поворачивая их в одном направлении, на одинаковое число зубьев. Таким образом добиваются необходимой величины предварительного натяга.

Как указывалось выше, недостатком этой конструкции является сложность сборки, так как для регулирования предварительного натяга в передаче корпус с гайками необходимо свинчивать с резьбы винта. По этой же причине невозможно регулирование натяга передачи непосредственно на станке.

Указанных недостатков лишена конструкция, в которой натяг регулируют изменением углового положения гаек, фланцы которых снабжены секторами, а торцы корпуса — отверстиями под штифты (см. рис. 4). Для создания предварительного натяга в этих передачах выполняют следующие операции: 1) винт устанавливают в тисках; 2) первую гайку, заполненную шариками, устанавливают на втулку; 3) втулку надевают на шейку винта, и гайку завинчивают на винт; 4) надевают на первую гайку корпус до упора во фланец гайки; 5) вторую гайку, заполненную шариками, устанавливают на втулку; 6) втулку надевают на шейку винта, и гайку завинчивают на винт до упора фланца в торец корпуса; 7) специальными ключами проворачивают первую гайку в сторону свинчивания с винта, а вторую — в сторону навинчивания до создания нужного натяга; 8) угловое расположение гаек фиксируют штифтами.

Регулирование предварительного натяга в других конструкциях передач не отличается принципиально от рассмотренных. После того как передача ВГК собрана с необходимым предварительным натягом, производят ее обкатку.

Рис. 44. Кинематическая схема стенда для обкатывания передач под нагрузкой

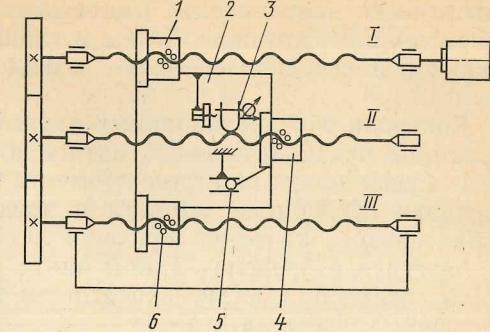
Обкатку передачи ВГК осуществляют для приработки вкладышей и винтовых поверхностей винта и гаек, с тем чтобы уменьшить изнашивание передачи в процессе эксплуатации. Для приработки канала возврата шариков с обеих сторон обкатывание осуществляют в реверсном режиме. В крупносерийном и массовом производстве передачи обкатывают на специальных стенах в течение 30—40 мин под действием тарированной осевой нагрузки или силы предварительного натяга. Частота вращения 500—700 об/мин, смазка передачи консистентная. Одна из возможных схем нагружения передачи осевой силой показана на рис. 44.

На станине размещены две параллельно установленные передачи I и III, имеющие одинаковый шаг. Корпуса 1 и 6 этих передач закреплены на плите 2. Передачу II, подлежащую обкатыванию, устанавливают в центрах параллельно передачам I и III. Нагрузочное устройство, установленное на плите 2, с помощью тарированного динамометра 3 создает необходимое осевое усилие на передачу II. Корпус 4 передачи II удерживает от поворота рычагом, опирающимся на шарикоподшипник, который движется по направляющим плиты 5. Все три винта приводят во вращение одним приводом. Равенство скоростей поступательного перемещения корпусов передач I и III достигается настройкой зубчатых колес редуктора. Так как передачи I и III нагружены силой, равной половине нагрузки на передачу II, то их долговечность в 8 раз будет превышать долговечность передачи II.

Во время обкатывания контролируют температуру на поверхности корпуса или гаек с помощью контактного термометра. Температура при обкатывании не должна превышать температуру окружающей среды более чем на 50 °С. В противном случае требуется переборка передачи, так как повышение температуры свыше указанной свидетельствует о плохом качестве сборки.

В единичном и мелкосерийном производстве обкатывание передач можно производить на переоборудованном токарном станке, обеспечивающем реверсивный режим работы. Нагрузку имитируют действием силы предварительного натяга.

На этапе приработки рабочих поверхностей винта, гаек, вкладышей и шариков происходит ускоренное изнашивание. Продукты изнашивания накапливаются в гайках, распределяются по резьбе винта и в дальнейшем являются причиной абразивного изнашивания деталей передачи. Для удаления этих продуктов резьбовые



поверхности винта и гаек тщательно промывают в ванне с уайт-спиритом или бензином. Затем в гайки засыпают комплект новых шариков и передачу собирают с необходимым предварительным натягом.

Контроль эксплуатационных характеристик. С целью проверки величины предварительного натяга и качества подгонки вкладышей осуществляют контроль момента холостого хода и жесткости передачи. Колебание момента в пределах одного оборота винта характеризует качество подгонки вкладышей. Изменение величины момента в пределах длины винта дает представление о конусности, бочкообразности, корсетности винта, а также о величине предварительного натяга.

При правильной подгонке вкладышей величина предварительного натяга в передаче и коэффициент трения качения однозначно определяют момент вспомогательного хода по формуле (4). В табл. 16 приведены величины момента вспомогательного хода

16. Момент вспомогательного хода передач при $F_n=0,07 C_0$

Параметр	Шаг передачи P , мм							
	5				6			
Номинальный диаметр d_0 , мм	20	25	32	40	50	32	40	50
$M_{x.x}$, Н·м	0,16	0,26	0,50	0,82	1,30	0,40	0,76	1,10

Продолжение табл. 16.

Параметр	Шаг передачи P , мм							
	10				12		20	
Номинальный диаметр d_0 , мм	40	50	63	80	100	50	80	100
$M_{x.x}$, Н·м	0,63	1,14	1,95	3,21	5,20	0,98	2,61	5,24

передач, собранных с осевой силой предварительного натяга $F_n=0,07 C_0$ (см. табл. 1).

В единичном производстве контроль момента вспомогательного хода осуществляют с помощью гирь, подвешенных на бечевке, которую наматывают на корпус передачи с закрепленным неподвижно в горизонтальном положении винтом. Массу гирь изменяют, и фиксируют ее значение в момент начала вращения корпуса с гайками. Измерение производят на различных участках винта, и момент определяют по формуле $M_{x.x}=4,9 mD$, где m — масса ги-

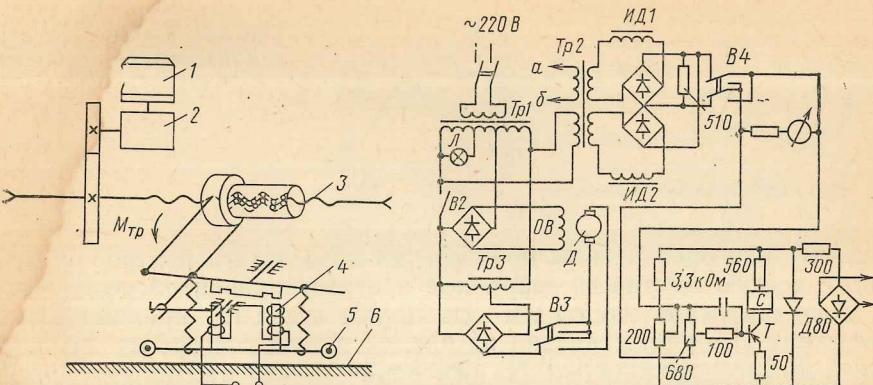


Рис. 45. Схема стенда для измерения момента вспомогательного хода передач ВГК

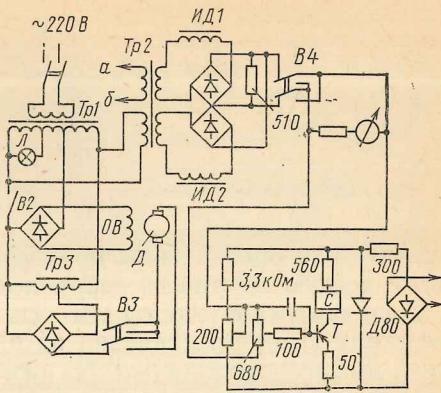


Рис. 46. Измерительная система стенда для измерения момента вспомогательного хода передач ВГК

ри, кг; D — наружный диаметр корпуса, м. В мелкосерийном производстве для контроля используют стенд на базе токарного, кругло- или резьбошлифовального станка. Винт устанавливают в центрах, например, круглошлифовального станка и приводят во вращение. На корпус передачи крепят хомут, предохраняющий винт от проворота и перемещающийся на подшипнике по направляющим стола. Хомут взаимодействует с плоской тарированной пружиной, величину прогиба которой измеряют индикатором. Момент вспомогательного хода определяют по таблицам пересчета в зависимости от жесткости пружины и расстояния от места заделки пружины до измерительного наконечника индикатора. Частоту вращения винта устанавливают в пределах 4—5 об/мин.

Одна из схем стендла для измерения момента в крупносерийном и массовом производстве показана на рис. 45.

Контролируемую передачу устанавливают в центрах стендла. Винт 3 вращают с частотой 4—5 об/мин с помощью электродвигателя 1 и редуктора 2. Момент, возникающий при вращении винта, через рычаг, закрепленный на корпусе передачи, воздействует на преобразователь силы 4. Последний жестко связан с корпусом передачи и перемещается по направляющим стендла 6 на шарикоподшипниках 5.

Измерительная система стендла (рис. 46) состоит из дифференциальных индуктивных датчиков ИД1 — ИД2 с Ш-образным сердечником, магнитный поток которого замыкается через подвижный якорь. Выход преобразователя подключен к микроамперметру и к входу усилителя. Нагрузкой усилителя является самописец. Схема позволяет изменять направление вращения винта передачи.

Величина момента вспомогательного хода неоднозначно определяет осевую силу предварительного натяга, так как на величину момента оказывают существенное влияние качество подгонки вкладышей и сборки, геометрия резьбовой части винта и гаек.

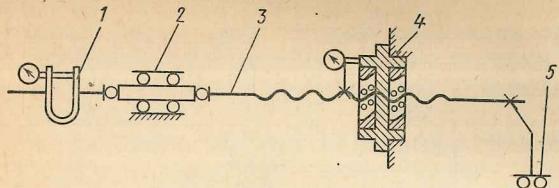


Рис. 47. Схема стенда для измерения жесткости передач ВГК

Поэтому для оценки силы предварительного натяга контролируют также осевую жесткость собранной и отрегулированной передачи.

Для измерения жесткости используют стенд [6], принципиальная схема которого показана на рис. 47. Стенд состоит из основания с высокой жесткостью. На основании крепят нагрузочное приспособление с динамометром 1. Устройство 2, выполненное в виде шариковой втулки, собранной с предварительным натягом, обеспечивает осевое нагружение передачи. Корпус передачи крепят к станне с помощью приспособления 4. Винт 3 удерживает от проворота рычагом 5, опирающимся на опору с шарикоподшипниками. Для устранения радиальной составляющей нагрузку прикладывают к стержню, размещенному в направляющих качения и передающему усилие на шарик, установленный в центральном отверстии винта. На винте закрепляют измерительное приспособление, позволяющее одновременно проводить измерения смещения корпуса относительно винта в трех равномерно расположенных по окружности точках с помощью трех преобразователей линейного перемещения. Осевую деформацию δ_{oc} определяют как среднее арифметическое значение измеренных перемещений. Осевая жесткость передачи

$$\gamma = F_{oc}/\delta_{oc},$$

где γ — жесткость, Н/мкм; F_{oc} — осевая сила, Н.

Величина жесткости с достаточной точностью является постоянной величиной для передач, собранных с предварительным натягом, и не зависит от действующего осевого усилия.

Жесткость передачи обычно проверяют на двух-трех участках по длине винта при приложении осевого усилия с двух сторон. Это дает возможность выявить наличие осевого зазора, возникшего в результате неправильной сборки передачи. В серийном и массовом производстве используют стены, в которых величину осевой деформации выводят на показывающий прибор или самописец.

Консервация и упаковка. Собранную и отрегулированную передачу, удовлетворяющую техническим условиям, консервируют, снабжают мешочком с силикагелем и запаивают в полиэтиленовый мешок. Каждую передачу укладывают на специальные подставки с прокладками и фиксируют для предохранения от повреждения при транспортировании. В мелкосерийном производстве передачи упаковывают в деревянные ящики. В крупносерийном или массовом производстве передач использование деревянной тары увеличивает расход древесины и снижает производительность труда.

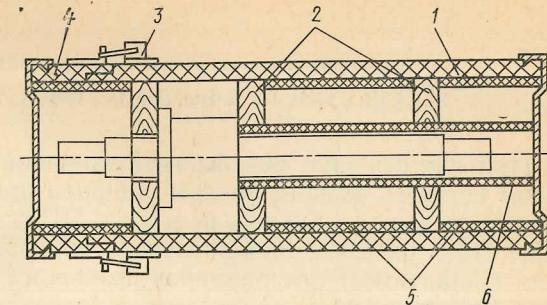


Рис. 48. Многооборотная тара для упаковки передач ВГК

Поэтому для централизованного производства рекомендуется использование оборотной тары [А. с. 703430 (СССР)]. Эта тара легка и влагонепроницаема, надежно обеспечивает сохранность передачи при транспортировании. Она представляет собой цилиндрический футляр с картонным корпусом 1 (рис. 48), изготовленным спиральной навивкой на формующий вал нескольких слоев картона и бумаги. Наружный слой проклеен водостойким kleem на основе битума. Корпус футляра по торцам снабжен закатанными цилиндрическими крышками. Крышка 4 — съемная и закрепляется липкой лентой или специальными защелками 3. Размещение винтов внутри тары производят в неподвижных цилиндрических опорах 2, фиксирующих передачу в радиальном направлении. В осевом направлении винты фиксируют посредством дистанционных проставок 5. С целью обеспечения возможности упаковки ВГК разных типоразмеров (диаметр и длина винта) в тару одного размера на винтах устанавливают картонные переходные втулки 6, различающиеся диаметром внутреннего отверстия и длиной.

Передачи упаковывают в футляры шести типоразмеров. Конструкция тары позволяет обеспечить сохранность передачи при их транспортировании любым видом транспорта. Тара герметична, имеет высокую жесткость в продольном направлении и незначительную массу.

ПРИЛОЖЕНИЯ

1. РЕКОМЕНДАЦИИ ПО ВЫБОРУ ИНСТРУМЕНТА И ОСНАСТКИ ПРИ ШЛИФОВАНИИ РЕЗЬБЫ ГАЙКИ

При шлифовании резьбы гаек большой длины или с большим углом подъема резьбы, которые широко применяют в производстве роботов и дыропробивных прессов с ЧПУ, следует предварительно определить размеры однониточного шлифовального круга и шпинделя в зависимости от размеров резьбы и гайки. Для этого используют формулу

$$L_p = \frac{1}{2 \sin \lambda} \left[\frac{\cos \lambda}{2} \sqrt{(D_1 - D_2)^2 - (D_3 - D_4)^2} - b \right],$$

где L_p — длина резьбовой части гайки, мм; λ — угол подъема резьбы, град; $\lambda = \arctg(P/\pi D_3)$; P — шаг резьбы, мм; D_1 — диаметр отверстия гайки, м; D_2 — диаметр шлифовального шпинделя, мм; D_3 — наружный диаметр резьбы гайки, мм; D_4 — наружный диаметр шлифовального круга, мм; b — ширина профиля резьбы в нормальном сечении, мм.

В соответствии с этой формулой проверяют длину резьбовой части гайки при оптимальных размерах круга и шпинделя и сравнивают с требуемой длиной резьбовой части.

2. ЖЕСТКОСТЬ ПЕРЕДАЧИ ВГК

Шаг резьбы P , мм	Номинальный диаметр резьбы, мм	Сила предварительного натяга, кН	Жесткость передачи, Н/мкм
5	20	1,0	530
	25	1,3	670
	32	1,9	970
	40	2,5	1250
	50	3,1	1580
6	32	2,0	950
	40	2,7	1235
	50	3,3	1560
10	40	4,0	1135
	50	5,7	1610
	63	7,6	2080
	80	10,0	2700
	100	12,5	3445
12	50	5,8	1490
20	80	13,7	2440
	100	21,6	3445

3. МОМЕНТ ВСПОМОГАТЕЛЬНОГО ХОДА ПЕРЕДАЧ ВГК

Шаг резьбы P , мм	Номинальный диаметр резьбы, мм	Сила предварительного натяга, кН	Максимальный момент вспомогательного хода, Н·м
5	20	1,0	0,16
	25	1,3	0,26
	32	1,9	0,50
	40	2,5	0,82
	50	3,1	1,30
6	32	2,0	0,46
	40	2,7	0,76
	50	3,3	1,20
10	40	4,0	0,63
	50	5,7	1,14
	63	7,6	1,95
	80	10,0	3,21
	100	12,5	5,20
12	50	5,8	0,98
20	80	13,7	2,61
	100	21,6	5,24

4. МАТРИЦА ПЛАНИРОВАНИЯ МНОГОФАКТОРНОГО ЭКСПЕРИМЕНТА для определения зависимости стойкости круга между правками и шероховатости поверхности от режимов шлифования резьбы ходовых винтов качения

Номер опыта	v_{kp} , м/с	v_H , м/с	t , мкм	T' , м	R_a , мкм	$lg T'$	$lg R_a$	$T_{расч}$, м	R_a расч, мкм	$\Delta T'$, %	ΔR_a , %
1	++	+	+	192	0,50	2,282	-0,301	162	0,49	15	2
2	++	+	+	214	0,32	2,332	-0,495	195	0,33	13	3
3	+	+	+	727	0,40	2,862	-0,398	758	0,40	3	0
4	+	+	+	651	0,24	2,813	-0,620	640	0,27	2	12
5	+	+	+	61	0,80	1,788	-0,097	62	0,88	1	10
6	+	+	+	352	0,51	2,547	-0,292	290	0,49	17	4
7	+	+	+	260	0,68	2,416	-0,168	240	0,71	7	4
8	+	+	+	77	0,60	1,884	-0,222	74	0,60	3	0

Примечание. Для верхнего уровня $v_{kp} = 45,2$ м/с; $v_H = 0,1$ м/с; $t = 40$ мкм; для нижнего — $v_{kp} = 33$ м/с; $v_H = 0,05$ м/с; $t = 20$ мкм.

5. МАТРИЦА ПЛАНИРОВАНИЯ ЭКСПЕРИМЕНТА 2³ ДЛЯ ОПРЕДЕЛЕНИЯ
ЗАВИСИМОСТИ МОЩНОСТИ от РЕЖИМОВ ШЛИФОВАНИЯ

Номер опыта	v_{kp} , м/с	v_q , м/с	t , мкм	N , Вт	$lg N$	$N_{расч}$, Вт	ΔN , %
1	+	—	—	289	2,460	311	6,0
2	+	+	—	448	2,6298	497	10,0
3	+	+	+	688	2,8182	765	10,0
4	+	—	+	427	2,5989	484	12,0
5	—	—	—	235	2,3697	242	2,7
6	—	+	—	380	2,5796	389	2,5
7	—	+	+	639	2,8054	617	3,4
8	—	—	+	392	2,5924	378	3,2

Примечание. Для верхнего уровня $v_{kp} = 45,2$ м/с; $v_q = 0,1$ м/с; $t = 40$ мкм; для нижнего — $v_{kp} = 33$ м/с; $v_q = 0,05$ мкм; $t = 20$ мкм.

7. РЕЗУЛЬТАТЫ ПРАВКИ ВИНТОВ МЕТОДОМ ОДНОСТОРОННЕГО СНЯТИЯ МЕТАЛЛА ПО ДНУ РЕЗЬБЫ, ММ

Допускаемый прогиб винта	Диаметр винта × шаг резьбы	Общая длина винта	Длина резьбовой части винта	Исходный прогиб	Прогиб винта после правки
0,055	63×10	1450	1100	0,35	0,020
0,055	63×10	1450	1100	0,27	0,030
0,010	40×5	700	250	0,22	0,008
0,010	40×5	700	250	0,09	0,010
0,010	40×5	700	250	0,36	0,010
0,055	63×10	1500	1000	0,45	0,010
0,010	63×10	916	550	0,29	0,010
0,010	63×10	916	550	0,14	0,010
0,095	40×10	970	700	0,41	0,025
0,095	40×10	970	700	0,32	0,018

6. СРЕДНИЙ ШАГ ВИНТОВ ПОСЛЕ ПРОКАТКИ И ЗАКАЛИ

Номер по пор.	После прокатки	После закалки	Номер по пор.	После прокатки	После закалки
1	9,990	9,998	25	9,995	—
2	9,989	—	26	9,993	—
3	9,987	10,005	27	9,991	10,010
4	9,989	10,000	28	9,993	—
5	9,989	10,004	39	9,994	—
6	9,990	10,005	30	9,991	—
7	9,988	—	31	9,992	10,008
8	9,984	—	32	9,990	—
9	9,988	10,004	33	9,989	—
10	9,986	10,004	34	9,987	—
11	9,988	10,000	35	9,993	10,012
12	9,990	—	36	9,990	10,011
13	9,989	—	37	9,990	10,004
14	9,989	—	38	9,990	10,002
15	9,991	10,004	39	9,990	10,006
16	9,992	10,006	40	—	10,011
17	9,990	10,003	41	—	10,008
18	9,991	10,010	42	—	10,008
19	9,982	10,007	43	—	10,009
20	9,990	10,003	44	—	10,010
21	9,990	10,008	45	—	10,010
22	9,990	10,007	46	—	10,010
23	9,990	10,008	47	—	10,011
24	9,990	10,007	48	—	10,008

1. Байкалов А. К. Введение в теорию шлифования материалов. — Киев: Наукова думка, 1978. 206 с.
2. Гликин А. С. Системы автоматической компенсации погрешностей кинематических цепей резьбообрабатывающих станков. М: Машиностроение, 1971. 76 с.
3. Головин Г. Ф. Остаточные напряжения, прочность и деформации при поверхностной закалке токами высокой частоты. Л: Машиностроение, 1973. 144 с.
4. Дубовик Н. П. Выбор рациональных режимов правки кругов из кубонита. — В сб.: Синтетические алмазы. ИСМ, 1978, вып. 5, с. 22—24.
5. Збарский Ю. Ш., Фомкин В. Г., Шкапенюк М. Б. Влияние погрешностей изготовления на жесткость передач винт — гайка качения. — Металлорежущие станки, Киев: Техника, 1976, вып. 4, с. 25—32.
6. Збарский Ю. Ш., Фомкин В. Г., Шкапенюк М. Б. Стенды для испытаний шариковинтовых передач на жесткость, момент холостого хода и долговечность. — Металлорежущие станки и автоматические линии. Научно-технический реферативный сборник, М: НИИМАШ, 1973, вып. 7, с. 20—23.
7. Качество изготовления зубчатых колес/А. В. Якимов, Л. П. Смирнов, Ю. А. Бояршинов и др. М: Машиностроение, 1979. 191 с.
8. Кудинов А. В. Расчет канала возврата шариков в передачах винт — гайка качения. — Станки и инструмент, 1976, № 4, с. 21—22.
9. Сипайлов В. А. Тепловые процессы при шлифовании и управление качеством поверхности. М: Машиностроение, 1978. 167 с.
10. Технологические предпосылки регулирования режущей способности шлифовальных кругов/А. В. Якимов, В. П. Ларшин, Ю. П. Русавский, В. А. Якимов. — Сверхтвердые материалы, 1980, № 6, с. 36—38.
11. Филимонов, Л. Н. Стойкость шлифовальных кругов. Л: Машиностроение, 1973. 134 с.
12. Хайловский Н. Т. Уточненный расчет профиля канала возврата шариков винтовых пар качения металлорежущих станков. — Металлорежущие станки, 1975, вып. 3, Киев: Техника, с. 125—132.
13. Шкапенюк М. Б. Влияние погрешностей изготовления на долговечность шариковинтовой передачи. — Металлорежущие станки, 1979, вып. 7, Киев: Техника, с. 61—69.
14. Шкапенюк М. Б. Расчет профиля канала возврата шариков цилиндрического вкладыша в передачах винт — гайка качения. — Станки и инструмент, 1979, № 3, с. 18—19.
15. Эльбор в машиностроении/Под общей ред. В. С. Лысанова, Л: Машиностроение, 1978. 380 с.
16. Этин А. О. Выбор оптимальных условий при решении технологических задач. — Станки и инструмент, 1976, № 3, с. 24—26.

Введение	3
Конструкция и основные характеристики передач ВГК	5
Технология производства ходовых винтов качения	20
Технология производства гаек и корпусов	97
Типовые технологические процессы и оборудование	107
Изготовление вкладышей	107
Сборка передач	113
Приложения	122
Список литературы	126

*Юрий Павлович Русавский,
Надежда Владимировна Соболева,
Михаил Борисович Шкапенюк*

ТЕХНОЛОГИЯ ПРОИЗВОДСТВА ШАРИКОВЫХ ПЕРЕДАЧ

Редактор *Л. Н. Корякина*
Художественный редактор *И. К. Капралова*
Обложка художника *В. В. Кареева*
Технический редактор *А. И. Захарова*
Корректор *Н. Г. Богомолова*

ИБ № 4153

Сдано в набор 16.07.84. Подписано в печать 17.01.85. Т-01822. Формат 60×90¹/₁₆. Бумага типографская № 2. Гарнитура литературная. Печать высокая. Усл. печ. л. 8,0. Усл. кр.-отт. 8,375. Уч.-изд. л. 8,93. Тираж 1902 экз. Заказ 1626. Цена 45 к.

Ордена Трудового Красного Знамени издательство «Машиностроение»,
107076, Москва, Строгинский пер., 4.

Московская типография № 6 Союзполиграфпрома при Государственном комитете СССР
по делам издательств, полиграфии и книжной торговли.
109088, Москва, Ж-88, Южнопортовая ул., 24.