

УДК 621.879.002.5.658.589

Ю. Ф. Набатников, к.т.н., проф., О. В. Белянкина, к.т.н., доц.,  
А. В. Баранов, к.т.н., ст. преп., Московский государственный горный  
университет

E-mail: [kaftmr@msmu.ru](mailto:kaftmr@msmu.ru)

## **Общая схема взаимозаменяемости и частные случаи ее реализации**

*Рассмотрены вопросы обеспечения заданной точности в соединениях деталей машин различными методами ее достижения.*

**Ключевые слова:** точность в соединениях деталей машин, схема взаимозаменяемости, методы достижения точности.

Yu. F. Nabatnikov, O. V. Belyankina, A. V. Baranov

## **The General Scheme of Interchangeability and Special Cases of its Implementation**

*The problems of ensuring a given accuracy in the compounds of machine parts by various methods of achieving it.*

**Keywords:** accuracy in the compounds of machine parts, circuit interchangeability techniques to achieve precision.

В общем случае сборка соединений может осуществляться с различными допусками на размеры отверстия ( $ITA$ ) и вала ( $ITB$ ), различными групповыми допусками ( $a, b$ ) и, как следствие, различными количествами размерных групп ( $n_1 \neq n_2$ ) [1].

Частными являются следующие случаи:

- сборка при равных допусках отверстия и вала ( $ITA=ITB$ ) с равным количеством размерных групп ( $n=n_1=n_2$ ) и равными групповыми допусками ( $a=b$ );
- сборка с различными допусками отверстия и вала ( $ITA \neq ITB$ ) при равном количестве размерных групп ( $n=n_1=n_2$ ) и разными групповыми допусками ( $a \neq b$ );
- сборка с различными допусками отверстия и вала ( $ITA \neq ITB$ ) при равных групповых допусках ( $a=b$ ) и разном количестве размерных групп ( $n_1 \neq n_2$ );
- сборка с различными или равными допусками отверстия и вала ( $ITA \neq ITB$  или  $ITA=ITB$ ) при групповых допусках  $a=ITA$  и  $b=ITB$  и

количестве размерных групп  $n=n_1=n_2=1$  (случай полной взаимозаменяемости).

Для организации сборки соединений необходимо выполнить определенные условия, при которых гарантируется отсутствие брака [2]. Под браком понимается выход зазора в определенном соединении за предельно допустимые значения. Рассмотрим общий случай сборки соединений, при котором допуски отверстия и вала не равны друг другу ( $ITA \neq ITB$ ). Примем, что не равны друг другу групповые допуски ( $a \neq b$ ) и количества размерных групп для отверстия и вала ( $n_1 \neq n_2$ ), а нижнее предельное отклонение размеров отверстия равно  $EIA$ . Схему сборки рассмотрим на примере соединений с зазором.

Сборка соединений должна обеспечить зазоры ( $S$ ), величина которых не выходит за предельно допустимые значения ( $S_{\min} \leq S \leq S_{\max}$ ). Для этого случая возможны два варианта. Пусть в первом варианте максимальный зазор ( $S_{\max}$ ) формируется в 1-й размерной группе и минимальный ( $S_{\min}$ ) – в  $n$ -й (рис. 1, а), а во втором варианте минимальный зазор формируется в 1-й группе и максимальный – в  $n$ -й (рис. 1, б).



Рис. 1. Общие схемы сборки соединений

Из схемы сборки для первого варианта следует:

$$S_{\max} = EIA + a - eib \text{ и } S_{\min} = (EIA + ITA - a) - (eib + ITB).$$

Вычитая из максимального зазора минимальный зазор и учитывая, что  $ITS = S_{\max} - S_{\min}$ , получим  $ITS = 2a - ITA + ITB$ ;  $a = (ITS + ITA - ITB)/2$ .

Так как величина  $a > 0$ , то  $ITS > ITB - ITA$  и  $ITA \leq ITB$ .

Вторым необходимым условием сборки является взаимное расположение допусков отверстия и вала. Из схемы сборки следует, что значение нижнего предельного отклонения размеров вала ( $eib$ ) определяется по формулам:

$$eib = EIA - S_{\min} - a - (ITB - ITA)$$

или

$$eib = EIA - S_{\max} + a.$$

Для варианта, при котором минимальный зазор формируются в 1-й размерной группе, а максимальный – в  $n$ -й (рис. 1, б):

$$ITS = 2b + ITA - ITB; b = (ITS + ITB - ITA)/2; ITS > ITA - ITB > 0.$$

В этом случае  $ITB \leq ITA$ .

Значение нижнего предельного отклонения размеров вала ( $eib$ ) для этого варианта определяется по формулам:

$$eib = EIA - S_{\min} - b \text{ или } eib = EIA - S_{\max} + b + (ITA - ITB).$$

Рассмотрим два частных случая. При  $ITA = ITB$  сборка может быть проведена по схеме рис. 1, а, если  $a < b$  и по схеме рис. 1, б, если  $a > b$ . При  $a = b$  сборка может проводиться как по схеме рис. 1, а, так и по схеме рис. 1, б. Величина  $eib$  в этом случае может назначаться из диапазона значений  $eib_{\max} = EIA - S_{\min} - a \geq eib \geq eib_{\min} = EIA - S_{\max} + b$  от  $eib_{\min}$  до  $eib_{\max}$  с шагом равным  $a$  ( $eib = eib_{\min} + a; eib = eib_{\min} + 2a; \dots eib = eib_{\max}$ ).

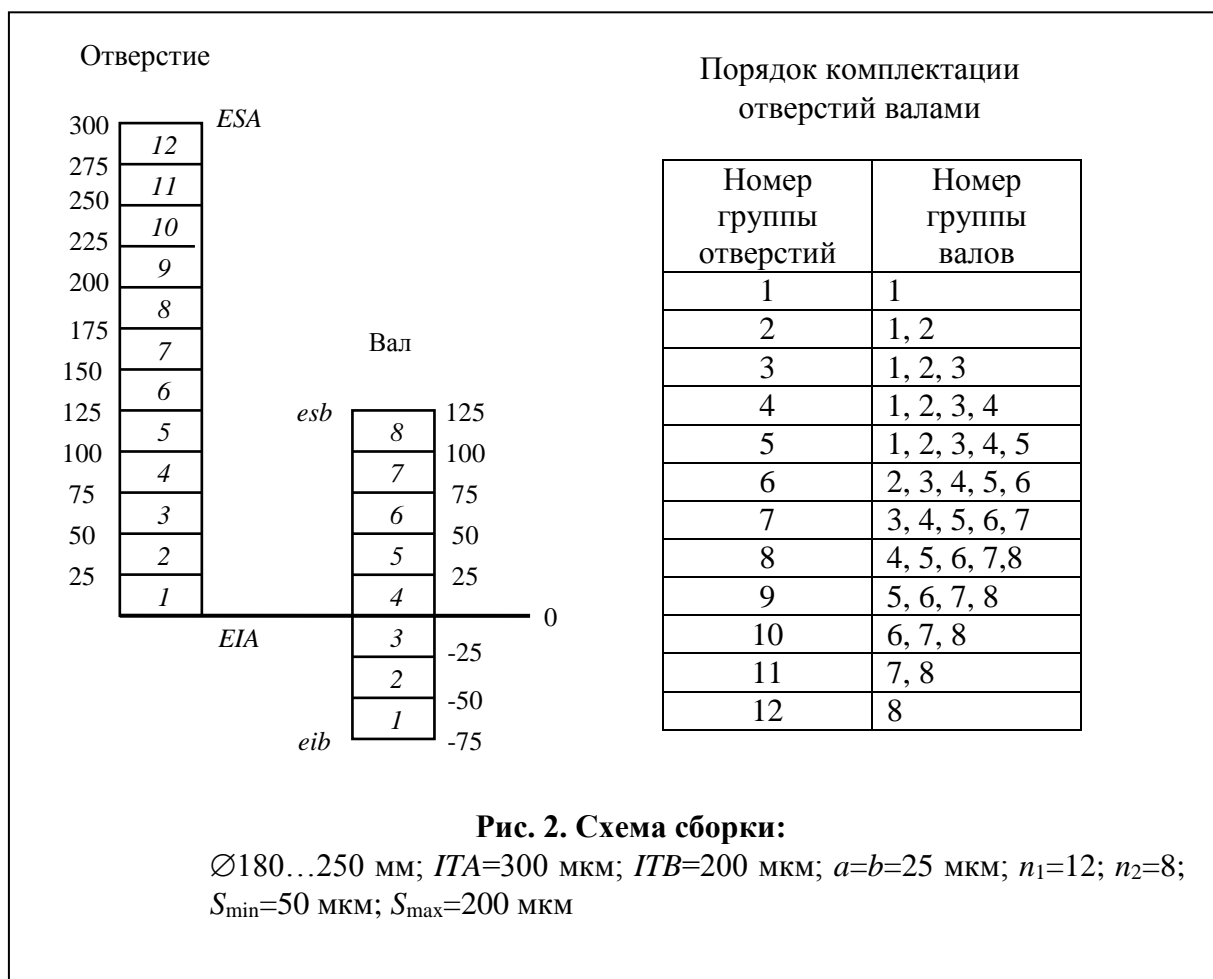
Если  $a = ITA$  и  $b = ITB$ , то  $n_1 = n_2 = 1$ . В этом случае сборка проводится по методу полной взаимозаменяемости, т.к. выполняется условие  $ITS = ITA + ITB$ .

Рассмотрим численный пример. Пусть поверхность цилиндра (отверстие) с внутренним диаметром  $\varnothing 200$  мм выполнена с точностью по  $H11$ . Допуск на размер поршня (вал) меньше допуска на размер отверстия ( $ITA > ITB$ ). В соединениях цилиндра с поршнем необходимо обеспечить зазоры ( $S$ ) по 8 качеству точности в пределах  $S_{\min} = 50 \leq S \leq S_{\max} = 200$  мкм. Требуется определить параметры селективной сборки, обеспечивающие такую точность в соединениях.

Задачу решаем в следующем порядке:

1. По таблицам единой системы допусков и посадок для интервала номинальных размеров  $\varnothing 180 \dots 250$  мм определяем допуск на размер отверстия  $ITA = 290$  мкм, что соответствует 11 качеству точности. Нижнее предельное отклонение размеров отверстия равно  $EIA = 0$ . Допуск на зазор в соединении равен  $ITS = S_{\max} - S_{\min} = 200 - 50 = 150$  мкм.

2. Назначаем групповые допуски для размеров отверстия и вала, в соответствии с техническими возможностями производства, которые позволяют проводить сортировку деталей с точность до 25мкм. Принимаем  $a=b=25\text{мкм}=ITS/6$ .
3. Находим количество размерных групп ( $n_1$ ) для отверстия:  
 $n_1=ITA/a=300/25=11,6$ . Принимаем  $n_1=12$  и корректируем допуск на размер отверстия  $ITA=n_1a=12\cdot 25=300\text{мкм}$ . Верхнее предельное отклонение размеров отверстия равно  $ESA=EIA+ITA=0+300=300\text{мкм}$ .
4. Определяем нижнее предельное отклонение размеров вала ( $eib$ ):  
 Допуск на размер отверстия больше допуска на размер вала. Поэтому сборка проводится по схеме рис.1, б, и нижнее предельное отклонение размеров вала равно  $eib=EIA-S_{\min}-b=0-50-25=-75\text{ мкм}$ .
5. Определяем верхнее предельное отклонение размеров вала  
 $esb=ESA-S_{\max}+b=300-200+25=125\text{ мкм}$ , допуск на размер вала  
 $ITB=esb-eib=125-(-75)=200\text{мкм}$  и число размерных групп для вала  
 $n_2=ITB/b=200/25=8$ .
6. Строим схему сборки и определяем порядок комплектации отверстий валами (рис. 2).



Из рис. 2. следует, что отверстия определенной размерной группы могут комплектоваться валами из нескольких размерных групп без образования брака в соединениях. Исключением являются лишь две крайние размерные группы отверстий (1-я и 12-я), которые комплектуются валами только одной размерной группы (1-й и 8-й). Порядок комплектации отверстий чрезвычайно прост. Сначала выбираются все валы из первой размерной группы затем – из второй и т.д. Организация сборки с такими параметрами может вызвать определенные затруднения в условиях конкретного производства. Так количество размерных групп для отверстий равно  $n_1=12$ , а для валов –  $n_2=8$ . Кроме того, отверстия и валы необходимо сортировать по такому количеству размерных групп с точностью в 25 мкм. Поэтому с точки зрения минимизации затрат на сборку и ее упрощения целесообразно рассмотреть и другие варианты. Например, вариант с меньшим количеством размерных групп для отверстия и вала и большими групповыми допусками.

Увеличим групповые допуски в 2 раза и примем, что  $a=b=ITS/3=150/3=50$  мкм. Проведя расчеты в том же порядке, нетрудно показать, что в этом случае параметры сборки будут равны:  $ITA=300$ мкм,  $EIA=0$ ,  $ESA=300$ мкм,  $ITB=250$  мкм,  $eib=-100$ мкм,  $esb=150$ мкм,  $n_1=6$ ,  $n_2=5$ .

Схема сборки и порядок комплектации отверстий валами для этого варианта представлены на рис. 3.



Сопоставляя последний вариант с первым, можно сделать выводы:

– в обоих вариантах обеспечивается заданная точность в соединениях по 8 качеству;

– во втором варианте уменьшилось количество размерных групп для отверстий (с 12 до 6) и валов (с 8 до 5);

– в два раза (с 25 до 50 мкм) увеличен размерный интервал для сортировки отверстий и валов;

– расширено поле допуска вала с  $ITV=200$  мкм до  $ITV=250$  мкм.

На первый взгляд, второй вариант имеет одни преимущества перед первым. Однако нетрудно заметить, что во втором случае резко сократилось количество групп валов, участвующих в комплектации отверстий определенной размерной группы. Этот фактор может оказать влияние на объем незавершенного производства и стать решающим при выборе варианта сборки.

Из рассмотренной общей схемы следует, что селективная сборка всегда многовариантна. Каждый вариант обеспечивает зазоры в соединениях не выходящие за предельно допустимые значения. Выбор конкретного варианта сборки должен проводиться с учетом следующих факторов:

- величина зазоров в соединениях;
- однородность соединений по величине зазора;
- количество непарных деталей, возникающих при сборке, и затраты, связанные с незавершенным производством.
- количество размерных (селективных) групп, трудоемкость сортировки деталей по группам, затраты на технические средства измерений и контроль размеров.

Взаимозаменяемость, при которой определенная размерная группа отверстий (валов) комплектуется валами (отверстиями) из нескольких размерных групп, будем называть *межгрупповой* [3].

Для обеспечения полной взаимозаменяемости между размерными группами валов и отверстий необходимо выполнение условия:  $a+b \leq ITS$ . Величины групповых допусков удобно задавать в долях от допуска на зазор. Полагая  $a=ITS/K_1$  и  $b=ITS/K_2$ , получим:  $a+b=ITS/K_1+ITS/K_2 \leq ITS$  или  $K_1+K_2 \leq K_1K_2$ . Это неравенство соблюдается при  $K_1 \geq 2$  и  $K_2 \geq 2$ . Из этого следует, что при селективной сборке величины групповых допусков не должны превышать половины допуска зазора, т.е. должны соблюдаться неравенства  $a \leq ITS/2$  и  $b \leq ITS/2$ .

Для удобства расчетов значения  $K_1$  и  $K_2$  следует принимать целыми из ряда: 2, 3, 4... $L$ . Кроме того, величина группового допуска должна быть кратной величине соответствующего допуска на размер. В противном случае количество селективных групп может оказаться дробным, а этого быть не может. При необходимости соответствующий допуск на размер

необходимо скорректировать в большую сторону либо изменить групповой допуск, чтобы обеспечить кратность этих двух величин.

При назначении групповых допусков необходимо учитывать возможности сортировочного оборудования и иметь в виду, что чем больше величина групповых допусков, тем меньше количество размерных групп, проще организация сборки, меньше затраты на сортировку деталей, а это достигается при меньших значениях  $K_1$  и  $K_2$ .

Для выявления влияния величины групповых допусков на организацию селективной сборки снова рассмотрим ее общие схемы. Из рис. 1 и условия полной взаимозаменяемости следует:

$$Z_{\max.в} b + a = ITS \text{ и } Z_{\max.о} a + b = ITS,$$

где  $Z_{\max.в}$  ( $Z_{\max.о}$ ) – максимальное количество размерных групп валов (отверстий) из которых может проводиться комплектация отверстий (валов) определенной размерной группы.

Проведя подстановки и решив уравнения относительно  $Z_{\max}$ , получим:

$$Z_{\max.в} = K_2(K_1 - 1)/K_1 \text{ и } Z_{\max.о} = K_1(K_2 - 1)/K_2 \text{ при } K_1 \neq K_2;$$

$$Z_{\max.в} = Z_{\max.о} = K - 1 \text{ при } K_1 = K_2 \text{ (если } a = b = ITS/K \text{)}.$$

Из этих уравнений следует, что чем больше значения  $K_1$  и  $K_2$ , тем больше размерных групп валов (отверстий) участвуют в комплектации определенной размерной группы отверстий (валов). Это делает сборку менее зависимой от случайной составляющей процесса обработки сопрягаемых поверхностей и резко уменьшает вероятность появления непарных деталей.

Таким образом, при селективной сборке возникает дилемма. Для упрощения организации сборки и сокращения затрат на сортировку деталей необходимо увеличивать групповые допуски, а для уменьшения вероятности появления непарных деталей и снижения затрат на обслуживание незавершенного производства их надо уменьшать. При проектировании технологических процессов сборки эту сложную задачу необходимо решать по результатам математического моделирования сборки на ЭВМ.

При селективной сборке очень важно обеспечить однородность соединений по величине зазора, т.к. близкие по величине зазоры обеспечивают одинаковые ресурсы соединений.

Рассмотрим условия образования однородных соединений. Из рис. 1, *a* следует, что при сборке соединений из деталей последних групп с номерами  $n_1$  и  $n_2$  максимальный, минимальный и средний зазор будут равны:

$$S_{\min} = EIA - eib - a + n_1a - n_2b; \quad S_{\max} = EIA - eib + b + n_1a - n_2b;$$

$$S_{\text{ср}} = EIA - eib - (a - b)/2 + n_1a - n_2b.$$

При сборке соединений из деталей первых размерных групп эти зазоры равны:

$$S_{\min} = EIA - eib - b; S_{\max} = EIA - eib + a; S_{cp} = EIA - eib - (a - b)/2.$$

Равенство зазоров в первой и последней размерных группах выполняется при следующих условиях:

$b = a + (n_2b - n_1a)$  – равенство минимальных и максимальных зазоров;

$n_2b - n_1a = 0$  – равенство средних зазоров.

Учитывая, что  $n_2b = ITB$  и  $n_1a = ITA$ , получим

$$b = a + (ITB - ITA) \text{ и } ITB - ITA = 0.$$

Для схемы рис. 7.1, б аналогичные уравнения имеют вид

$$a = b + (ITA - ITB) \text{ и } ITA - ITB = 0.$$

Таким образом, однородность соединений по величине зазоров обеспечивается при равенстве допусков на размеры отверстия и вала ( $ITA = ITB$ ) и равенстве групповых допусков ( $a = b$ ). В этом случае селективная сборка проводится с одинаковым количеством размерных групп для отверстия и вала ( $n_1 = n_2$ ).

В общем случае законы распределения размеров отверстий и валов могут не соответствовать друг другу. Имеется в виду, что размеры отверстий могут быть распределены, например, по нормальному закону, а размеры валов – по закону Симпсона или равной вероятности. Кроме того, действительные законы распределения размеров валов и отверстий, как правило, несимметричны. При изготовлении валов центр группирования размеров обычно смещается в сторону исправимого брака, т.е. в сторону больших валов, а при изготовлении отверстий – в сторону меньших значений. Смещение фактического центра группирования от середины поля допуска оценивается коэффициентом относительной асимметрии ( $\alpha$ ), который в производственных условиях может изменяться в пределах  $-0,3 \leq \alpha \leq +0,3$ .

При сборке методом полной взаимозаменяемости такое смещение положительно влияет на качество сборки. В соединениях формируются меньшие зазоры, что повышает их ресурс.

При селективной сборке наибольшее количество деталей типа «отверстие» накапливается в первых размерных группах, а типа «вал» – в размерных группах с большими номерами. Поэтому количество валов в первых размерных группах существенно меньше чем в последних, а при сборке неизбежно возникают непарные детали. В этом случае сборка должна вестись по схеме рис. 1, а при значениях  $eib$  близких или равных  $eib_{\min}$ , т.к. комплектация отверстий первых размерных групп из нескольких размерных групп валов существенно снижает вероятность возникновения непарных деталей.

Из изложенного следует, что параметры селективной сборки должны обеспечивать максимальную ее независимость от случайных составляющих процесса обработки поверхностей. Это достигается при использовании межгрупповой взаимозаменяемости.



Для определения объема незавершенного производства по каждому варианту необходимо провести на ЭВМ моделирование процесса сборки с использованием соответствующего программного обеспечения. Другого эффективного решения данной задачи, на наш взгляд, не существует.

Для получения в соединениях однородных по величине зазоров и упрощения сборки допуски на размер вала и отверстия следует принимать равными ( $ITA=ITB$ ), а сборку проводить с равными групповыми допусками ( $a=b$ ) при равном количестве размерных групп для отверстия и вала ( $n_1=n_2$ ).

При проектировании технологического процесса сборки групповые допуски должны быть кратными допуску отверстия (вала) и их удобно задавать в долях от величины допуска на зазор: ( $a=b=ITS/2$ ,  $a=b=ITS/3$ ,  $a=b=ITS/4$ ,  $a=b=ITS/5$ ,... $a=b=ITS/K$ ). Максимальное количество размерных групп валов, участвующих в комплектации определенной размерной группы отверстий, равно  $K-1$ . Учитывая гиперболическую зависимость между величиной группового допуска и ее долей от допуска на зазор (натяг), величину  $K$  следует принимать равной  $K=2$ , или  $K=3$ , или  $K=4$ , или  $K=5$ . При больших значениях  $K$  величина группового допуска изменяется незначительно.

С другой стороны, чем больше величина групповых допусков, тем меньше количество размерных групп, организация сборки проще, меньше затраты на сортировку деталей, а это достигается при меньших значениях  $K_1$  и  $K_2$ . Сопоставление затрат на сортировку деталей по размерным группам с затратами на обслуживание незавершенного производства позволяет установить экономически обоснованные групповые допуски.

#### Выводы:

1. Сборка соединений деталей машин может быть проведена при любых ее параметрах без образования брака. В зависимости от значений параметров сборки реализуются все известные методы достижения заданной точности (методы полной, групповой и межгрупповой взаимозаменяемости).
2. При использовании метода межгрупповой взаимозаменяемости существенно уменьшается зависимость сборки от типов законов распределения отклонений размеров, их количественных параметров и сочетаний.
3. Метод межгрупповой взаимозаменяемости позволяет существенно уменьшить вероятность образования и накопления незавершенного производства за счет комплектации определенной размерной группы деталей типа отверстия валами из нескольких размерных групп.

#### Список литературы

5. Радкевич Я.М., Схиртладзе А.Г., Лактионов Б.И. Метрология, стандартизация и сертификация / М.: Высшая школа, 2007. 791с.
6. Булатов В.П. и др. Расчет точности машин и приборов. -С-Пб.: Политехника, 1993.-495 с., ил.
7. Набатников Ю.Ф. Обеспечение заданного ресурса соединений деталей машин.// Сборка в машиностроении и приборостроении. – 2011. -№4. – С.3-8.