ТРУДЫ ХАРЬКОВСКОГО АВИАЦИОННОГО ИНСТИТУТА

Выпуск 17 1957

АНАЛИТИЧЕСКИЕ МЕТОДЫ РАСЧЕТА ВЕСА И ВЕСОВЫХ ДОПУСКОВ С ПРИМЕНЕНИЕМ ТЕОРИИ ВЕРОЯТНОСТЕЙ

Л. Д. Арсон

I. АНАЛИТИЧЕСКИЕ РАСЧЕТЫ ВЕСА

Расчет веса самолетных и других конструкций при проектировании ведется в настоящее время путем определения объемов деталей. Суммируя веса деталей, полученных умножением объемов на удельные веса, определяются веса узлов, агрегатов и самолета в целом.

Для подсчета объема каждая деталь расчленяется на отдельные элементы. Расчет объема производится по его номинальным размерам, проставленным в чертеже или оговоренным в технических условиях на поставку материалов и полуфабрикатов.

Несмотря на то, что расчеты объемов производятся с большой точностью, полученные в результате величины веса не совпадают во многих случаях с практическими данными взвешиваний. Это в значительной мере объясняется принципиальной ошибочностью расчета веса по номинальным размерам.

В действительности у листового проката, прессованных профилей, в литье, у штампованных и механически обработанных изделий фактические размеры отличаются от номинальных. Поэтому расчет веса по номинальным размерам дает искаженную картину при определении объема отдельного элемента и погрешность при расчете деталей и узлов, когда веса элементов складываются.

Ошибка при определении веса по номинальным размерам без учета наличия колебаний фактических размеров может достигать 5—8%, что является совершенно недопустимым.

Рассмотрим причины возникновения погрешности и способы повышения точности расчета веса.

1. Расчет объема и веса элемента

Расчет объема элемента по номинальным размерам дает неправильное представление о величине объема, ибо не учитывает, как по отношению к номиналу расположены допуски и как в пределах этих допусков, группируются фактические размеры.

Рассмотрим простейший элемент (рис. 1); объем такого элемента определяется тремя размерами: S, B, L.

Каждый из этих размеров выполняется в пределах заданных допусков. Элемент может быть толще и тоньше, длиннее и короче, шире и уже заданных номинальных размеров. Фактические значения размеров элемента весьма разнообразны и являются величиной колеблющейся и переменной. Так, в качестве примера на рисунке 2 показан элемент номинальной толщины S_n, у которого колебание толщины, отмеченное пунктирными прямыми, происходит в пределах допуска.

Величину поля допуска определяют размеры: минимальный — $S_{\min}$ и максимальный — $S_{\max}$. Но внутри поля допуска может встретиться любой размер: S_1, S_2, S_3, S_4 и т. д.

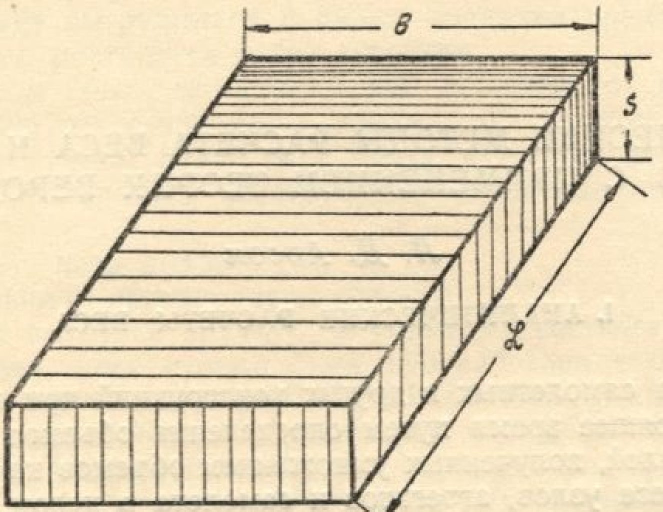

Рис. 1.

При рассмотрении большой партии изделий размеры $S_{\min}$ и $S_{\max}$ а также S_1, S_2, S_3, S_4 и другие будут встречаться в различном количестве, то есть с различной частотой (m).

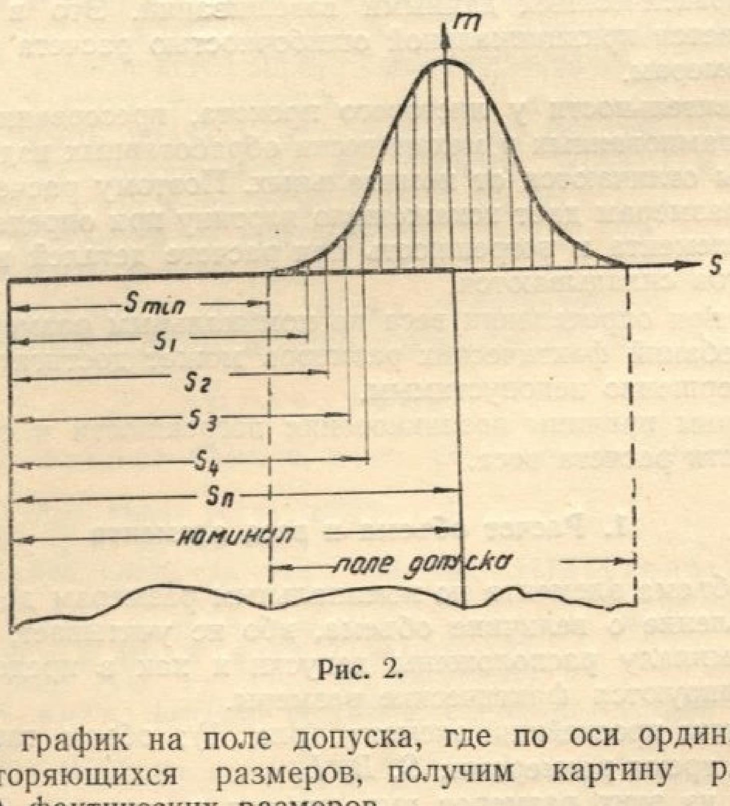

Рис. 2.

Построив график на поле допуска, где по оси ординат отложены частоты повторяющихся размеров, получим картину распределения (рассеивания) фактических размеров.

Различным типам конструкций и технологических процессов будет соответствовать своя форма распределения с присущими им особенностями группирования размеров.

В отдельных случаях размеры группируются вблизи номинала, но могут, вследствие ряда причин, существенно отходить от него. Более того, иногда фактические размеры, равные по значению номиналу, или вообще отсутствуют, или встречаются очень редко. Это зависит прежде всего от того, как располагается поле допуска по отношению к номиналу. При симметричных допусках величины размеров часто группируются вблизи номинала. При несимметричных допусках определенное число наиболее часто встречающихся размеров отходит от номинала.

Наиболее характерным примером является расположение поля допуска по отношению к номиналу у листов из цветных сплавов. Листы из алюминиевых и магниевых сплавов имеют несимметричное и целиком расположенное в минусовую сторону поле допуска.

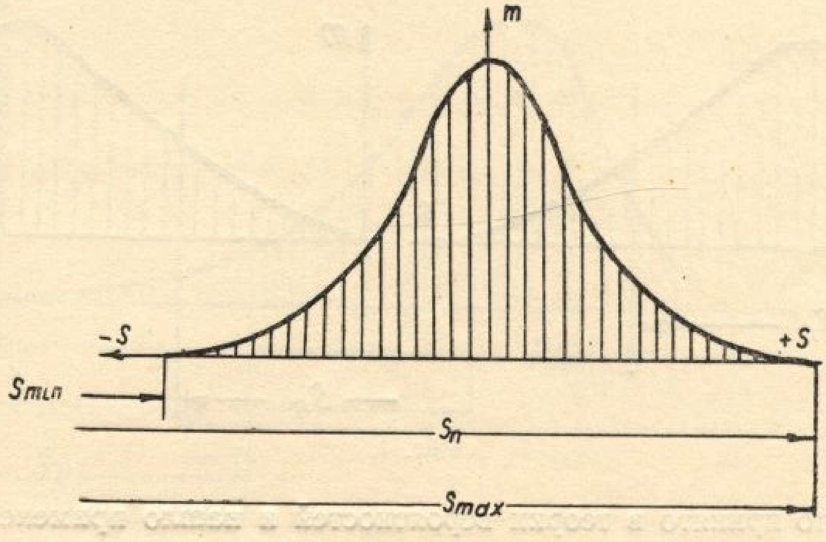

Рис. 3.

Если предположить, что форма графика распределения размеров симметрична и подобна представленной на рисунке 3, то в этом случае размеры, равные по значению номиналу, практически не встречаются.

Объем элементов, подсчитанный по такому номинальному размеру, не может характеризовать правильно вес, ибо в е р о я т н о с т ь появления элементов с таким весом практически ничтожна.

Подобные несимметричные допуски встречаются почти во всех самолетных конструкциях: почти всегда у изделий с механической обработкой, у большинства литых крупногабаритных изделий, всегда у штампованных деталей, в некоторых типо-размерах прессованных профилей.

Второй причиной, влияющей на отход группирующихся размеров от номинала, является технологический процесс, который определяет характер группирования фактических размеров. Распределение по своей форме может быть симметрично и асимметрично.

На рисунке *4а,б* в качестве примера показано ассиметричное распределение, у которого фактические размеры группируются в стороне от номинального размера.

Примером асимметричного распределения, да еще при несимметричных допусках, могут служить штампованные изделия. У штампованных изделий допуски в плюсовую сторону превышают минусовые. И при этом распределении фактических размеров во многих случаях несимметричны и подобны указанному на рисунке *4б*. Очевидно,что объем, подсчитанный по номинальным размерам таких изделий, не может характеризовать вес, так как подавляющее большинство элементов будет иметь вес бóльший, чем это следует из расчета. В других случаях вес будет значительно занижен по отношению к весам, могущим наиболее часто встречаться в практике.

Какой же размер из всего ряда распределения следует считать типичным и положить в основу расчета веса?

Появление того или иного размера внутри поля допуска есть явление случайное. Сама величина размера, значит, есть величина случайная, а распределение размеров — распределение случайных величин. Поэтому расчеты веса необходимо производить по законам теории вероятностей, оперирующей случайными величинами.

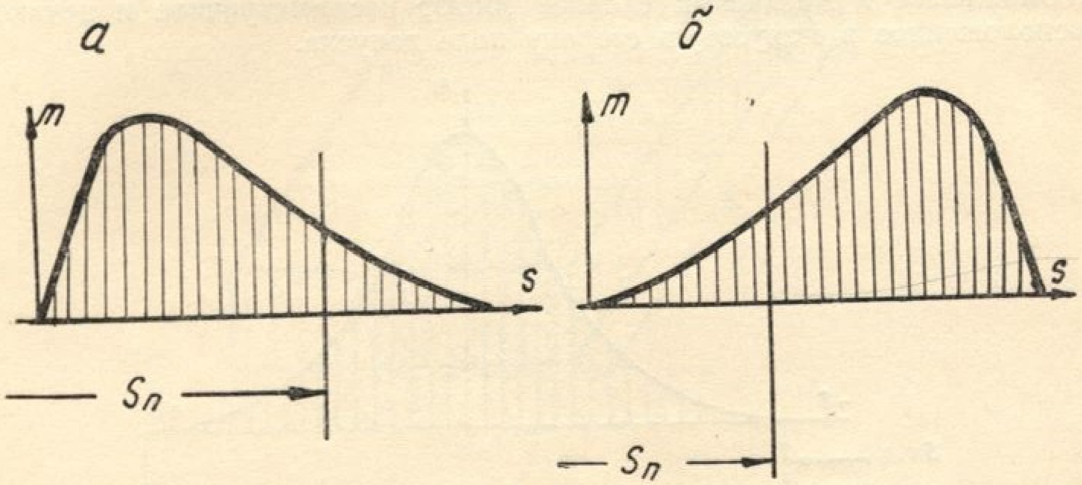

Рис. 4.

Как это принято в теории вероятностей и нашло применение в теории размерных цепей, центр группирования распределения фактических размеров необходимо характеризовать средним значением этой случайной величины.

Здесь средним значением или, как принято в дальнейшем именовать, «средней» размера или «средней» веса является взвешенное среднее арифметическое колеблющейся величины.

Средняя размера

$$\overline{X}=\frac{\Sigma x_i m_i}{\Sigma m_i}, \tag{1,1}$$

где x_i — текущие значения величины размера;

m_i — частота, то есть число повторяющихся размеров в партии.

Для непрерывных величин

$$\overline{X}=\int_{-\infty}^{+\infty} x_i \varphi(x)\,dx, \tag{1,2}$$

где $\varphi(x)$ — частности, выражаемые непрерывной функцией.

При пользовании вместо частот частностями выражение (1,1) преобразовывается путем подстановки значения частности ω_i

$$\omega_i=\frac{w_i}{\Sigma m_i}. \tag{1,3}$$

Приведенные выражения дают возможность производить расчет центров группирования размеров различных конструкций, выполненных разнообразными технологическими методами.

Таким образом, первой задачей, которую необходимо решить при установлении методов расчета веса, является исследование форм распределений фактических размеров и характерных для них значений средней величины.

Поскольку средняя является характеристикой центра группирования случайной величины, а значит и величины веса, то подсчеты объема необходимо производить по среднему значению колеблющейся величины размера. Однако, практические расчеты объема удобнее производить все же по номинальным размерам, так как номинал является в большинстве случаев простым, а не дробным числом. Это упрощает расчеты. Тогда смещение центра группирования следует учитывать в виде поправки на объем и вес, определенных по номинальному размеру.

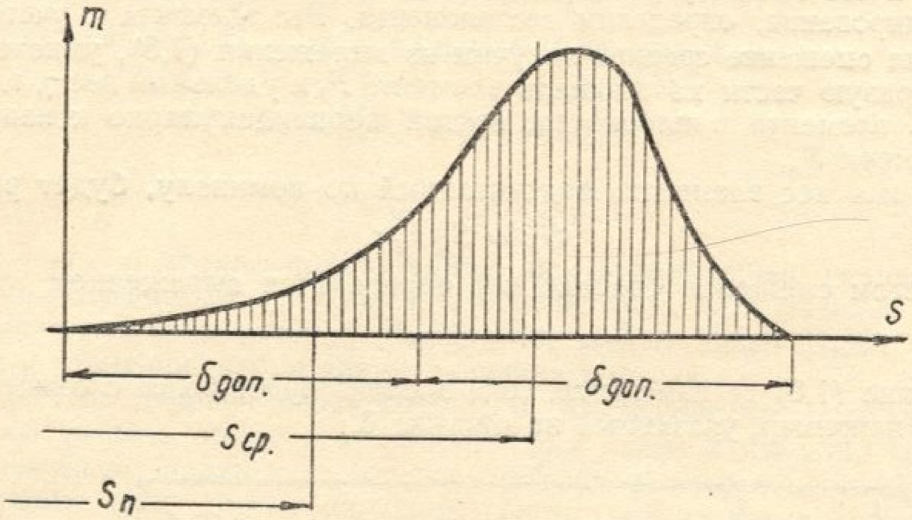

Рис. 5.

Смещение центра группирования по отношению к номиналу будем характеризовать коэффициентом сдвига средней или коэффициентом относительной асимметрии. Так, при наличии указанной на рисунке 5 формы распределения толщины S коэффициент относительной асимметрии α_i будет определяться следующим выражением

$$\alpha_i = \frac{S_{ср} - S_{п}}{\delta_{доп}}, \tag{1,4}$$

где $\delta_{доп}$ — половина поля допуска.

При наличии известных для определенных конструкций и технологических процессов коэффициентов относительной асимметрии и пользуясь заданными номинальными размерами и допусками, легко определить значение средней:

$$S_{ср} = S_{п} + \alpha_i \delta_{доп}. \tag{1,5}$$

Таким образом, второй задачей является определение коэффициентов относительной асимметрии у изделий различных конструкций и при различных технологических процессах.

Из анализа характера колебаний размеров изделий механической обработки и исследованных нами других технологических процессов следует, что в некоторых случаях форма распределения частот повторяющихся размеров не стабильна.

Асимметрии кривых распределения размеров различны даже при одинаковых технологических процессах. Поэтому при выборе коэффициентов асимметрии для расчетов веса, учитывая многообразие и возможности производства, следует назначать такие величины, которые могут стимулировать повышение культуры производства и весовой культуры.

Рассматривая простейшие элементы, из которых состоят различные изделия, мы видим, что объем каждого элемента определяется несколькими колеблющимися величинами размеров. Колебания каждого из размеров оказывают различное влияние на объемы и веса.

Как следует из анализа допусков на размеры в разных направлениях, в большинстве случаев наибольшее влияние на колебание объема и положение средней объема оказывает величина, характеризующая толщину элемента. Приняв, что только толщина является колеблющейся величиной и что только у размера по толщине происходит смещение центра группирования, определим вес элемента. Вес элемента с учетом поправки на смещение средней получим из выражения (1,5), умножив левую и правую части на площадь элемента F_i и удельный вес γ, где F_i — площадь элемента в плоскости, взятой перпендикулярно к направлению размера S_n.

Так как вес элемента, подсчитанный по номиналу, будет равен

$$G_{ni} = S_{ni} F_i \gamma,$$

то с учетом смещения средний вес определится выражением

$$G_{i\,\text{ср}} = G_{ni} + \alpha_i F_i \varepsilon_{\text{доп}} \gamma. \tag{1,6}$$

Выражение (1,6) не изменится, если элемент будет более сложный формы, как например, указанный на рисунке 6.

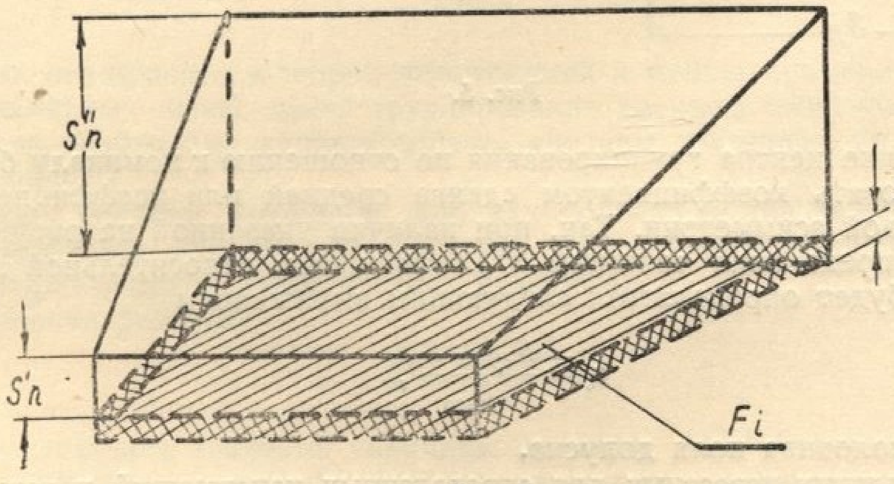

Рис. 6.

Даже, если элемент имеет переменную толщину S_n', S_n'' и т. д., выражение (1,6) останется в силе, если величина поля допуска $2\delta_{\text{доп}}$ одинакова у всех размеров по толщине.

В этом случае номинальный вес G_n определяется номинальными размерами элемента, а дополнительный член учитывает смещение средней веса по отношению к номиналу.

2. Расчет веса изделия

Вес изделия является суммой весов элементов. Исходя из теорем теории вероятностей, суммировать необходимо средние значения величины веса. Неправильно производить суммирование весов элементов, подсчитанных по номинальным размерам. Возьмем для примера узел клепанной конструкции, выполненный из листов алюминиевого сплава. У таких листов допуск на толщину дается только в минусовую сторону.

Проведенные исследования фактических размеров толщин листов показали, что форма таких распределений близка к закону нормального распределения. При этом листы, имеющие номинальные размеры, встречаются весьма редко. Тем более ничтожна вероятность того, что в одном узле встретятся все детали, выполненные из листов номинальной толщины.

Суммируя же средние веса, характеризующие центры группирования распределения фактических размеров, будет получено действительное представление о весе изделия. Тогда вес изделия определится выражением:

$$G_r = \Sigma G_{i\,\text{ср}}. \tag{1,7}$$

Подставив значение $G_{i\,\text{ср}}$ из выражения (1,6), получим:

$$G_r = \sum G_{ni} + \sum \alpha_i F_i \delta_{\text{доп}} \gamma,$$

или

$$G_r = G_{nr} + \sum \alpha_i F_i \delta_{\text{доп}} \gamma, \tag{1,8}$$

где G_{nr} — вес изделия, подсчитанный по номинальным размерам. И здесь определение веса сводится к определению веса изделия по номинальным размерам изделия и поправке, учитывающей форму распределения и сдвиг средней, а также величину допуска.

Пользуясь теорией вероятностей и приведенными выражениями, можно определить объем и вес элемента, а затем и изделия, когда на объем оказывает влияние не только колебание размеров по толщине, но и колебания всех других размеров. Тогда вес элемента определится выражением:

$$G_{i\,\text{ср}} = G_{ni} + \alpha_{is} F_s \delta_{\text{доп}\,s} \gamma + \alpha_{iL} F_L \delta_{\text{доп}} \gamma + \alpha_{iB} F_B \delta_{\text{доп}B} \gamma, \tag{1,9}$$

где индексы S, L и B означают, что коэффициент асимметрии, площадь и допуск рассматриваются по отношению к каждому из колеблющихся размеров S, L, B (рис. 1).

3. Расчет расхода материалов

При определении потребного расхода материалов, аналогично расчету веса изделий, имеет место погрешность, если расчет ведется по номинальным размерам.

Поскольку потребное количество материала устанавливается путем расчета объема, а объем определяется размерами, являющимися величинами колеблющимися и случайными, то и в этом случае расчеты необходимо производить, основываясь на теории вероятностей.

Практически методы расчета расхода материалов ничем не отличаются от методов расчета веса изделий. Расчет расхода материала, как и расчет веса, производится по номинальным размерам, а поправка, учитывающая сдвиг средней, принимается с учетом тех же коэффициентов относительной асимметрии α_i, что и при расчетах веса. Применяя такие уточненные методы расчета, может быть получена определенная экономия расхода некоторых материалов. Так, например, в случае расчетов расходов материалов из листовых алюминиевых и магниевых сплавов по методам теории вероятностей потребное количество материалов сокращается на 5—8%, так как эти материалы выполняются с минусовыми допусками и средняя у них сдвинута в сторону меньших размеров по отношению к номиналу.

В других случаях, как например при расчетах расхода прессованных профилей и листовых сталей, потребный расход материалов несколько увеличивается. Это объясняется тем, что в указанных материалах средняя несколько сдвинута по отношению к номиналу в сторону больших значений. Игнорирование этого обстоятельства приводит к тому, что потребитель систематически недополучает некоторое количество таких материалов.

Применение теории вероятностей для расчетов расхода материалов дает возможность уточнить материальные спецификации, что будет способствовать экономии материалов и устранению явлений недостатка материалов.

II. АНАЛИТИЧЕСКИЙ РАСЧЕТ ДОПУСКОВ НА ВЕС

Поскольку размеры каждого изделия колеблются, то имеет место колебания объема, а значит и веса.

Расчет допуска на вес должен исходить из учета величины колебаний каждого из размеров и их взаимосвязей. Впервые метод расчета допусков, основанный на учете отклонений размеров, был предложен Н. Р. Лещинским, В. П. Дюжкиным и Н. А. Смолянским [6]. По предложению авторов, допуск на вес изделия определялся путем простого арифметического суммирования максимальных отклонений веса отдельных элементов.

При этом отклонение веса элемента определялось, как результат «погрешностей» размеров. Такое суммирование «погрешностей» предполагает возможность появления изделий, у которых все размеры будут одновременно выполнены или на нижнем или на верхнем пределе поля допуска. При наличии в изделии значительного числа элементов вероятность сочетаний элементов со всеми предельными размерами совершенно ничтожна.

Проведенный подсчет по этому методу показывает, что колебание веса металлического крыла учебно-тренировочного самолета должно составлять приблизительно 12%. Фактическое же колебание веса не превышает 3%. Колебание веса лонжерона, выполненного из листов алюминиевых сплавов и прессованных профилей, должно составлять по расчету, проведенному таким методом, приблизительно 11%, а фактическое колебание веса не превышает 2,5%.

Эти и многие другие примеры подтверждают недопустимость аналитических расчетов допусков на вес методами, предложенными П. Р. Лещинским, Е. П. Дюжкиным и Н. А. Смолянским.

В настоящее время допуски на вес регламентируются различными производственными инструкциями, которые, как правило, устанавливают допуск на вес в виде процента от веса деталей, узла или агрегата. При этом совершенно не учитывается, что изделие может изготовляться из различных материалов и различными технологическими способами и что допуски на размеры не будут одинаковы. Зависит колебание веса и от числа сочетающихся в изделии элементов и их расположения в конструкции. В результате у двух одинаковых по весу, но разных по конструкции и технологии деталей колебание, веса может быть совершенно различно.

Учитывая несовершенство такого способа установления допуска на вес в виде процента от веса, другие производственные инструкции рекомендуют назвать весовой допуск на основании анализа статистики взвешивания.

Основным недостатком статистического метода при некоторых его преимуществах перед первым является то, что при этом, в той или иной мере, узаконивается фактическое состояние принятой технологии. Такой допуск на вес поэтому не может стать средством повышения культуры производства и весовой культуры.

Поскольку появление того или иного размера внутри поля допуска есть явление случайное, а именно от величины колебания размеров будет зависеть колебание объема и веса, то и к расчету допусков на вес необходимо применять методы теории вероятностей.

Методы определения допусков на вес, основанные на применении теории вероятностей, для частного случая расчета литых изделий впервые предложены С. А. Казенновым [7, 8]. Положив в основу расчета значение величины отклонения размеров в пределах доля допуска, автор, однако, не учел, что величина поля рассеивания фактических размеров отличается от величины поля допуска вследствие наличия допуска на модель.

С. А. Казеннов также не учел наличия корреляционных связей между величинами колеблющихся размеров отдельных элементов и ряд других обстоятельств.

Как показали проведенные расчеты, весовые допуски, определенные на основе положений работ С. А. Казенного, значительно отличаются от практически предельных фактических отклонений веса.

Поэтому даже для литых изделий предложенные С. А. Казенновым методы определения весовых допусков нуждаются в пересмотре и уточнении.

1. Расчет предельных колебаний веса и допусков на вес отдельных элементов

Рассмотрим простейший элемент, определяемый тремя размерами (рис. 1). По всем трем направлениям имеет место колебание размеров. Поскольку в большинстве случаев основное влияние на колебание веса имеет изменение размеров по толщине элемента, то, пренебрегая величинами колебаний двух других размеров, первоначально учтем только влияние толщины.

В данном частном случае колебание веса, очевидно, пропорционально колебанию толщины. При известной форме распределения размеров по толщине и известном расположении распределения по отношению к полю допуска предельные отклонения веса от средней определятся выражениями:

1. Когда предельный размах распределения (поле рассеивания величины размера) укладывается в поле допуска (рис. 7), нижнее отклонение веса

$$\Delta G_{\text{н}} = (\delta_{\text{н}} + \alpha_i \delta_{\text{доп}}) F\gamma, \tag{1,10}$$

верхнее отклонение веса

$$\Delta G_{\text{в}} = (\delta_{\text{в}} - \alpha_i \delta_{\text{доп}}) F\gamma, \tag{1,11}$$

где $\delta_{\text{доп}}$ — половина поля допуска;

$\delta_{\text{н}}$ и $\delta_{\text{в}}$ — нижний и верхний допуски на толщину;

F — площадь элемента в плоскости, перпендикулярной к толщине

γ — удельный вес.

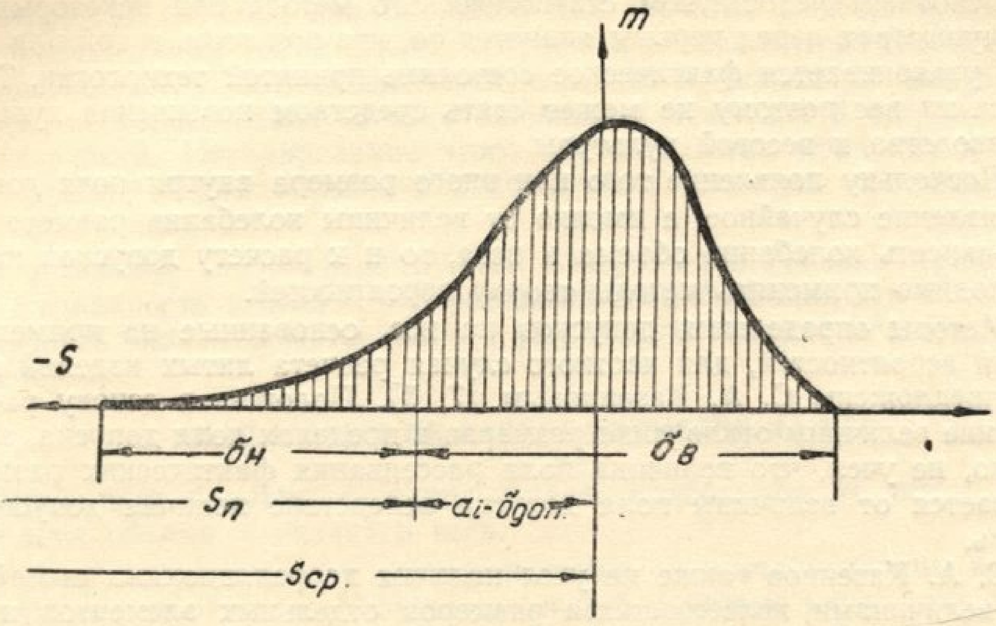

Рис. 7.

2. Когда предельный размах распределения больше или меньше поля допуска (рис. 8), нижнее отклонение веса

$$\Delta G_{\text{Н}} = \delta_{\text{Н ряда}} F\gamma, \tag{1,12}$$

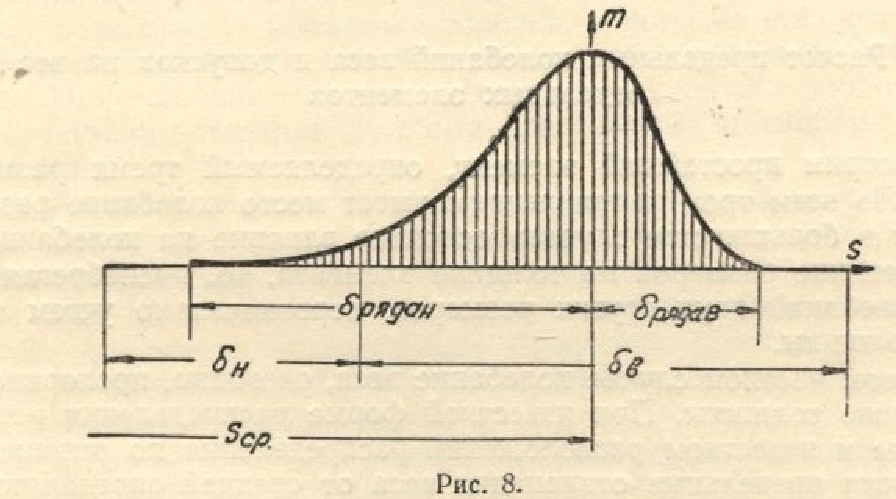

Рис. 8.

верхнее отклонение веса

$$\Delta G_{\text{В}} = \delta_{\text{В ряда}} F\gamma, \tag{1,13}$$

где $\delta_{\text{Н ряда}}$ и $\delta_{\text{В ряда}}$ — верхнее и нижнее значения предельных отклонений размеров, отсчитанных от средней величины размера.

Случаи, когда практически предельные отклонения превышают поле допуска, встречаются в практике часто и известны из исследований распределений размеров изделий механической обработки и при других технологических процессах. Это может являться результатом неправильного установления допусков. Но тогда допуски необходимо пересмотреть.

Однако в большинстве случаев практически предельные отклонения выходят за поле допуска в случае нарушения технологии. Строить допуски на вес, исходя из таких отклонений, нельзя. Поэтому допуск на вес должен определяться выражениями (1,10) и (1,11).

Одновременно необходимо отметить, что имеют место технологические процессы, когда поле рассеивания в силу ряда причин, как например в литье, меньше поля допуска.

Если поле рассеивания может располагаться по всему полю допуска, занимая там любое положение из указанных на рисунке 9 и любое промежуточное, то расчет допуска на вес элемента ведется по тем же выражениям (1,10) и (1,11), но при расчете колебания веса изделия в целом это обстоятельство необходимо учесть особо.

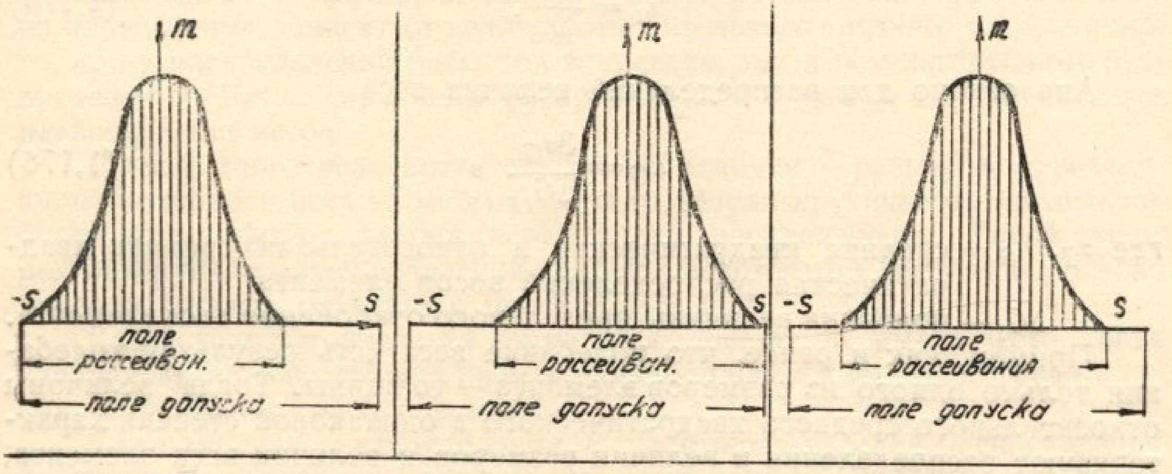

Рис. 9.

Таким образом, для выявления предельных величин колебания веса элемента необходимо определить, как располагается поле рассеивания ряда распределения размеров толщин по отношению к полю допуска и по отношению к средней.

2. Определение предельных отклонений и допусков на вес изделия

Предельные отклонения величины веса изделия зависят от предельных отклонений весов элементов, так как нельзя предположить, чтобы в одном изделии при значительном числе сочетающихся элементов одновременно сложились все элементы максимальной толщины, а в другом — минимальной.

Расчеты отклонений, как и расчеты веса, необходимо вести на основе теории вероятностей.

Мерой рассеивания распределения случайных величин размеров элементов, а значит объемов и весов, является средняя квадратическая:

$$\sigma_i = \sqrt{\frac{\sum(x_i - \overline{x})^2 m_i}{\sum m_i}}, \tag{1,14}$$

и для непрерывных величин:

$$\sigma_i = \sqrt{\int_{-\infty}^{+\infty} (x_i - \overline{x})^2 \varphi(x)\, dx}. \tag{1,15}$$

Мера рассеивания результирующего распределения объема или веса изделия, появляющегося вследствие накопления случайных отклонений в отдельных элементах, определяется выражением:

$$\sigma_r = \sqrt{\sum \sigma_G^2}. \tag{1,16}$$

Поскольку для расчетов допусков необходимо выяснить значения предельных отклонений, то воспользовавшись приемом, предложенным доктором технических наук Н. А. Бородачевым [3] для расчетов размерных цепей, сделаем переход от среднего квадратического к предельному отклонению.

Примем, что предельное отклонение определяется полем допуска, и введем понятие относительного среднего квадратического

$$\lambda_i = \frac{3\sigma_i}{\delta_{\text{доп}}}. \tag{1,17а}$$

Аналогично для распределений величин веса

$$\lambda_G = \frac{3\sigma_G}{\Delta G_i}, \tag{1,17б}$$

где σ_G, λ_G — средняя квадратическая и относительная средняя квадратическая распределений весов элемента,

ΔG_i — половина величины предельного отклонения веса элемента.

Примем, как и ранее, что колебание веса есть результат колебания только одного из размеров элемента — толщины. Тогда величины относительного среднего квадратического в одинаковой степени характеризуют распределения и величин размеров и величин веса элемента, то есть $\lambda_G = \lambda_i$. Следовательно,

$$\lambda_i = 3\frac{\sigma_i}{\Delta G_i}. \tag{1,18}$$

Для результирующего ряда распределения веса изделия, состоящего из нескольких элементов, введем аналогичное понятие относительного среднего квадратического λ_r, определяемого следующим выражением:

$$\lambda_r = 3\frac{\sigma_r}{\Delta G_r}, \tag{1,19}$$

где ΔG_r — половина предельного отклонения веса. Подставив значения σ_i и σ_r из выражений (1,18) и (1,19) в выражение (1,16), получим величину предельного отклонения веса

$$\Delta G_r = \sqrt{\sum\left(\frac{\lambda_i}{\lambda_r}\right)^2 \Delta G_i^2}. \tag{1,20}$$

Отличие формы распределения величин отдельных размеров от формы результирующего распределения будем характеризовать коэффициентом относительного рассеивания k_i

$$k_i = \frac{\lambda_i}{\lambda_r}. \tag{1,21}$$

Выразим предельные отклонения (1,20) через коэффициент относительного рассеивания (1,21). Тогда

$$\Delta G_r = \sqrt{\Sigma k_i^2 \Delta G_i^2}. \tag{1,22}$$

Выразим приращение веса элемента ΔG_i через величину колебания толщины

$$\Delta G_i = \delta_{\text{доп}} F_i \gamma_i, \tag{1,23}$$

где,как и раньше, $\delta_{доп}$ — половина поля допуска по толщине;

F_i — площадь элемента, перпендикулярная размеру толщины;

γ_i — удельный вес.

Тогда половина предельной величины колебания веса изделия определится выражением:

$$\Delta G_r = \sqrt{\Sigma k_i^2 \delta_{доп}^2 F_i^2 \gamma_i^2}. \tag{1,24}$$

Введенный коэффициент относительного рассеивания k_i, как следует из определения, зависит от величин относительного среднего квадратичного, как у распределений размеров элементов, так и результирующих распределений. Результирующим распределением в нашем случае является распределение весов.

В силу многочисленности случайных величин — размеров, определяющих колебание веса во многих случаях, результирующее распределение будет иметь форму закона нормального распределения. Такой закон результирующего распределения положен некоторыми авторами в основу методов расчета размерных цепей (1,3).

Вследствие устойчивости нормального закона это имеет место, когда распределения фактических размеров приближаются по своей форме к закону нормального распределения.

Как показывают исследования, у некоторых изделий распределения фактических размеров отличаются от нормального. Поэтому для определения величин коэффициентов относительного рассеивания необходимо выяснить, каковы формы результирующих распределений.

До сих пор рассматривалось приближенно, что колеблется только размер толщины элемента.

В случае, если имеет место колебание других размеров элемента, то очевидно, что сочетание их в результирующих распределениях также необходимо учитывать по теории вероятностей, то есть воспользовавшись всеми вышеприведенными выражениями. При этом допуски $\delta_{доп}$ и площади F_i необходимо принимать взаимно соответствующими каждому из колеблющихся размеров.

3. Учет корреляционных зависимостей

Выражение (1,24) определяет предельную величину колебания веса в случаях, когда случайные величины размерностей отдельных элементов являются взаимно независимыми.

При наличии корреляционных связей между величинами отдельных размеров выражение (1,16) преобразуется следующим образом:

$$\sigma_r = \sqrt{\Sigma \sigma_i^2 \pm 2\Sigma R_{ikn} \sigma_{ik} \sigma_{in}}. \tag{1,25}$$

Аналогично преобразуется и выражение (1,22), если выполнить переход от среднего квадратического к предельным отклонениям

$$\Delta G_r = \sqrt{\Sigma k_i^2 \cdot \Delta G_i^{\prime} \pm 2\Sigma R_{kn} k_{ik} k_{in} \Delta G_{ik} \Delta G_{in}}. \tag{1,26}$$

Соответственно преобразуется и выражение (1,24)

$$\Delta G_r = \sqrt{\Sigma k_i^2 \delta_{доп}^2 F_i^2 \gamma^2 \pm 2\Sigma R_{kn} k_{ik} k_{in} \delta_{доп\,k} \delta_{доп\,n} F_{ik} F_{in} \gamma_k \gamma_n}, \tag{1,27}$$

где индексы k и n характеризуют порядковые номера величин размеров элементов, между которыми имеет место корреляционная зависимость;

R — коэффициент корреляции, значение которого определяется характером существующих связей между величинами размеров.

Величины размеров могут находиться между собой как в функциональной, так и в стохастической зависимостях. При стохастической зависимости каждому значению размера одного элемента могут соответствовать несколько значений размера другого элемента.

В пределе, когда каждому значению размера одного элемента соответствует только одно значение размера другого элемента, зависимость является функциональной и коэффициент корреляции становится равным единице. При стохастических зависимостях коэффициент корреляции меньше единицы и когда отсутствуют взаимные связи, его значение становится равным нулю.

Если при возрастании размера одного элемента проходит одновременное стохастическое увеличение размера другого элемента,то коэффициент корреляции будет иметь знак плюс. Если же при увеличении размера одного элемента происходит соответствующее уменьшение размера другого элемента, то коэффициент корреляции будет иметь знак минус.

Как следует из анализа некоторых конструктивных форм и технологических процессов, например, у литых изделий, у прессованных профилей, между величинами размеров отдельных элементов существуют корреляционные как прямые, так и обратные зависимости. Поэтому в расчетах предельных отклонений необходимо в соответствующих случаях на основе изучения взаимосвязей распределений размеров отдельных элементов учитывать коэффициент корреляции.

Этим исчерпывается рассмотрение вопросов расчета предельных отклонений веса.

Расчет допуска на вес будет отличен от расчета предельного отклонения, ибо в основу расчета допуска необходимо положить такие коэффициенты, которые не будут слепо регистрировать фактическое состояние, а будут содействовать повышению культуры производства и весовой культуры.

III. ОПРЕДЕЛЕНИЕ ПРАКТИЧЕСКИ ПРЕДЕЛЬНОЙ ВЕЛИЧИНЫ ВЕСА

Практически предельную величину веса, подобно весу и допуску на вес, следует определять, исходя из теории вероятностей.

При симметричных результирующих распределениях, то есть распределениях веса изделий, предельные отклонения располагаются симметрично около средней.

Поскольку выражения (1,26) и (1,27) определяют половину величины предельного отклонения веса, то предельный вес $G_{\text{пред}}$ будет равен средней веса плюс половина величины предельного отклонения веса

$$G_{r\,\text{пред}} = G_{r\,\text{ср}} + \Delta G_r. \qquad (1,28)$$

При асимметричных результирующих распределениях весов изделий рассчитанная величина практически предельного колебания веса остается без изменения. Но верхнее и нижнее отклонения от средней становятся несимметричными (рис. 10).

Эту асимметрию, как сдвиг средней в результирующем распределении, будем характеризовать коэффициентом относительной асимметрии

$$\alpha_r = \frac{G_{r\,\text{ср}} - G_r\Delta}{\Delta G_r}, \qquad (1,29)$$

где $G_{r\,ср}$ — средняя результирующего распределения;

$G_r\Delta$ — координата середины распределения;

ΔG_r — половина практически предельного колебания веса.

Зная коэффициенты относительной асимметрии результирующих распределений для различных конструкций и технологических процессов, не представит труда определить и допуски на вес и практически предельные величины веса.

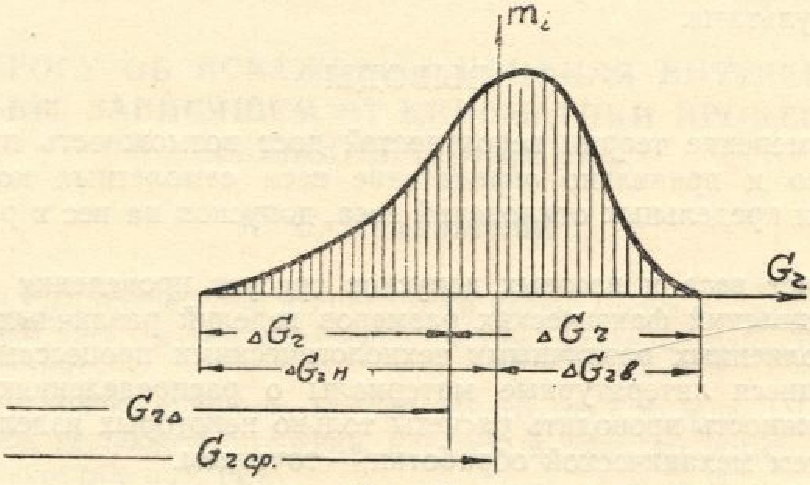

Рис. 10.

Нижний предел отклонения веса от средней

$$\Delta G_{r\,н} = \Delta G_r (1 + \alpha_r). \quad (1,30)$$

Верхний предел отклонений веса узла

$$\Delta G_{r\,в} = \Delta G_r (1 - \alpha_r). \quad (1,31)$$

Практически предельная величина веса

$$G_{r\,пред} = G_{r\,ср} + \Delta G_r (1 - \alpha_r). \quad (1,32)$$

Во многих случаях таким образом рассчитанный предельный вес будет значительно отличаться от веса, рассчитанного по номиналу с учетом допуска, принятого в различных производственных инструкциях. Для примера рассмотрим клепанный узел, состоящий из листовых деталей алюминиевого сплава. Как мы ранее указывали, листы из алюминиевого сплава выполняются с допуском только в минусовую сторону, и распределение размеров в пределах поля допуска близко к закону нормального распределения. Рассмотрим два узла, состоящие из материалов Д-16 толщиной $S_n = 1{,}5$ *мм*. Примем для простоты, что один узел состоит из 10, а другой — из 100 одинаковых по весу деталей. Допуск на толщину в минусовую сторону у листов из алюминиевых сплавов шириной 1500 *мм* и толщиной $S_n = 1{,}5$ *мм* составляет 0,25 *мм*.

Ввиду симметрии распределения толщин у листов средняя веса у деталей будет меньше веса, определенного по номиналу, на 8,35%. Средняя веса узлов также будет меньше веса, подсчитанного по номиналу на 8,35%.

По выражению (1,23) определим предельный вес. Для узла, состоящего из 10 одинаковых листовых деталей, предельный вес будет меньше веса, определенного по номиналу на 5,7%. Для аналогичного узла, но состоящего из 100 деталей, предельный вес будет меньше веса, определенного по номиналу, на 7,5%.

Из приведенного примера становится очевидным, что расчет веса и даже предельного веса по номинальным размерам дает весьма значительную погрешность во всех случаях, где поле допуска и распределение фактических размеров несимметрично.

А так как в подавляющем большинстве самолетных и многих других конструкций применяются именно несимметричные допуски на размеры, несимметричны во множестве случаев и распределения фактических размеров, то принятые в настоящее время методы расчета веса дают ошибочные результаты.

ВЫВОДЫ

1. Применение теории вероятностей дает возможность производить более точно и правильно определение веса самолетных конструкций, практически предельных отклонений веса, допусков на вес и расхода материалов.

2. Расчет веса и весовых допусков требует проведения исследований распределений фактических размеров изделий различных конструкций и выполненных различными технологическими процессами.

Имеющиеся литературные материалы о распределениях размеров дают возможность проводить расчеты только некоторых изделий, выполненных путем механической обработки — точением.

Для расчета веса и весовых допусков, выполненных путем штамповки из листа, объемной штамповки, литья, различных видов механической обработки и прессованных элементов, а также сборных узлов, необходимо выполнить специальные исследования.

ЛИТЕРАТУРА

1. Балакшин Б. С. Размерные цепи. Энциклопедический справочник «Машиностроение», т. V, 1947.
2. Балакшин Б. С. Технология станкостроения, 1949.
3. Бородачев Н. А. Обоснование методики расчета допусков и ошибок кинематических цепей, 1942.
4. Бородачев Н. А. Анализ качества и точности производства, 1946.
5. Бородачев Н. А. Основные вопросы теории точности производства, 1950.
6. Лещинский Б. Р., Дюжкин Е. П., Смолянский Н. А. Вес и весовые допуски деталей и агрегатов самолета, 1938.
7. Казеннов С. А. Системы допусков на вес отливок. «Литейное производство», 1951, № 12.
8. Казеннов С. А. К вопросу построения нормали на допуски и припуски для отливок по выплавляемым моделям. «Литейное производство», 1954, № 9.
9. Производственные инструкции по весовому контролю.