

**Выводы.** Разработана программа расчета составляющих силы резания при алмазном точении, позволяющая моделировать различные условия обработки, что необходимо для расчета конструктивных элементов резца. При использовании программы в рамках учебного процесса студенты получают возможность наглядно и самостоятельно отслеживать силы при чистовой обработке различных сплавов с переменными значениями составляющих режимов резания и геометрии инструмента. Знание максимально возможных составляющих сил резания позволит им более правильно рассчитывать конструкции резцов. Это дает возможность более грамотного назначения режимов резания при чистовой алмазной обработке.

#### СПИСОК ЦИТИРУЕМЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Левданский, А. М. Обработка резцом с механическим креплением вставки из искусственного алмаза алюминиево-магниево-кремниевых сплавов / А. М. Левданский, С. А. Левданский // Вестник БрГТУ. – 2013. № 4 (82): Машиностроение. – С. 24
2. Круглов, Г. А. Алмазная обработка часовых деталей / Г. А. Круглов, И. К. Тарасевич. – М. : «Приборостроение», 1961.

УДК621.91.002

### **ТЕОРЕТИКО-ВЕРОЯТНОСТНЫЙ РАСЧЕТ КОЛИЧЕСТВА НЕПОДВИЖНЫХ КОМПЕНСАТОРОВ РАЗНОЙ ТОЛЩИНЫ ПРИ ДОСТИЖЕНИИ ТОЧНОСТИ СБОРКИ МЕТОДОМ РЕГУЛИРОВАНИЯ**

*Медведев О. А., Апанович А. Ю. Мартынов Д. В.*

Брестский государственный технический университет, г. Брест,  
Республика Беларусь

В условиях серийного производства машин достижение точности замыкающих звеньев длинных сборочных конструкторских размерных цепей методами полной или неполной взаимозаменяемости часто экономически неприемлемо из-за необходимости высокой точности составляющих звеньев. В таких условиях попадание замыкающего звена в пределы его малого допуска обеспечивается целенаправленным регулированием значения одного из составляющих звеньев – компенсатора. В случае использования наиболее простого неподвижного компенсатора, его размер регулируется ступенчато, путем выбора компенсатора из заранее изготовленного комплекта. Используя компенсатор определенного размера можно за счет допуска замыкающего звена компенсировать часть суммарного поля рассеяния других составляющих звеньев, равную (в идеале) этому допуску. Используя второй компенсатор, который больше первого на величину допуска замыкающего звена, можно компенсировать еще такую же часть общего поля рассеяния составляющих звеньев, примыкающую к первой, и так далее. В идеале степень компенсации (разность размеров соседних компенсаторов в комплекте) равна допуску замыкающего звена, а число компенсаторов в комплекте на одно изделие равно отношению суммарного поля рассеяния составляющих звеньев (величины компенсации) к допуску замыкающего звена. В

действительности ступень компенсации должна быть меньше из-за наличия погрешностей определения требуемого размера компенсатора и его изготовления.

Размер компенсатора, для конкретного экземпляра изделия обычно определяется измерением полости под компенсатор, сформированной при предварительной сборке части изделия, включающей детали, размеры которых являются составляющими звеньями рассматриваемой конструкторской сборочной размерной цепи. При этом на место замыкающего звена устанавливается его эталон, а компенсатор в изделие не устанавливается. Если размеры выбранного компенсатора и полости для него будут равны, то при окончательной сборке экземпляра изделия без эталона и с выбранным компенсатором замыкающее звено будет равно размеру эталона.

При использовании компенсатора устраняется прямая зависимость отклонения замыкающего звена от отклонений составляющих звеньев сборочной конструкторской размерной цепи, но возникает его зависимость от погрешностей изготовления компенсатора и выполнения сборочных работ, при малости которых можно получать высокую точность замыкающего звена при невысокой точности остальных звеньев цепи.

Установить взаимосвязь между предельными значениями замыкающего звена, составляющих звеньев, компенсатора, погрешностями сборочных работ можно на основе наглядной, компактной и рациональной схемы компенсации допусков составляющих звеньев, которую возможно построить на основе сборочной конструкторской размерной цепи, выявленной по сборочному чертежу изделия. Для сокращения числа элементов схемы компенсации (с целью повышения ее наглядности) в ней все составляющие звенья (кроме компенсатора) целесообразно заменить суммарным составляющим звеном  $A_{\Sigma}$ , оказывающим равноценное влияние на замыкающее звено, и равное алгебраической сумме всех увеличивающих и уменьшающих составляющих звеньев реальной цепи (кроме компенсатора).

Рассматривая суммарное составляющее звено как случайную величину, являющуюся суммой большого числа слагаемых случайных величин, можно считать, что его значения подчиняются нормальному закону распределения в пределах его поля рассеяния  $TA_{\Sigma} = 6\sigma_{\Sigma}$  [1, 3]. Поле рассеяния  $TA_{\Sigma}$  (величина компенсации) можно определить по правилу сложения случайных величин [1,3] как сумму полей рассеяния составляющих звеньев (кроме компенсатора).

$$\Delta A_{\Sigma} = \sqrt{\sum_{j=1}^{j=m+n} TA_j^2} \quad (1)$$

Замена составляющих звеньев на суммарное составляющее звено позволяет преобразовать любую реальную сборочную конструкторскую размерную цепь на математически равноценную трехзвенную цепь, состоящую из суммарного составляющего звена  $A_{\Sigma}$ , компенсатора  $K$  и замыкающего звена  $A_{\Delta}$ .

Тщательный анализ влияния компенсаторов на замыкающие звенья линейных сборочных конструкторских размерных цепей для машин разного назначения позволяет свести все многообразие реальных сборочных конструкторских

цепей к трем вариантам математически равноценных трехзвенных цепей, характеризующихся следующим сочетанием составляющих звеньев: 1) увеличивающее суммарное составляющее звено и увеличивающий компенсатор ( $\vec{A}_\Sigma \dot{\epsilon} \vec{E}$ ); 2) увеличивающее суммарное составляющее звено и уменьшающий компенсатор ( $\vec{A}_\Sigma \dot{\epsilon} \vec{E}$ ); 3) уменьшающее суммарное составляющее звено и увеличивающий компенсатор ( $\vec{A}_\Sigma \dot{\epsilon} \vec{E}$ ). Сочетание уменьшающего суммарного составляющего звена и уменьшающего компенсатора ( $\vec{A}_\Sigma \dot{\epsilon} \vec{E}$ ) в трехзвенных размерных цепях невозможно.

На основе этих трех вариантов трехзвенных цепей разработаны три типовые схемы компенсации  $TA_\Sigma$ .

Рассмотрим построение схемы компенсации для второго варианта трехзвенной цепи, так как такое сочетание довольно часто встречается в конструкциях машин. Для этого каждое звено такой трехзвенной цепи представим двумя его предельными размерами и полем рассеяния.

Для увязки полей рассеяния погрешностей сборочных работ, размеров технологической сборочной оснастки, размеров компенсаторов с полем допуска замыкающего звена  $TA_\Delta$ , в схему компенсации включены элементы технологической размерной цепи, формирующейся при предварительной сборке изделия. Замыкающим звеном в ней является размер выбранного компенсатора, а составляющими звеньями, кроме размеров деталей изделия, также являются размеры используемой сборочной оснастки (эталона замыкающего звена конструкторской цепи) и погрешности выполнения сборочных работ. Таким образом, отклонение замыкающего звена от его эталонного значения равно отклонению размера выбранного компенсатора от размера полости под компенсатор, сформированной без погрешностей.

Погрешность размера компенсатора будет складываться из погрешностей тех звеньев технологической цепи, которые при предварительной сборке конкретного изделия могут приобретать случайные значения, отличающиеся от их значений в конструкторской цепи, и отклонений звеньев, отсутствующих в конструкторской цепи. К ним относятся: погрешность изготовления эталона замыкающего звена  $\epsilon_\Sigma$ , погрешность установки эталона  $\epsilon_{у\epsilon}$ , погрешность измерения полости под компенсатор  $\epsilon_u$ , погрешность изготовления компенсатора  $\epsilon_{ик}$  (равна допуску размера изготовленного компенсатора  $TK$ ), погрешность выбора компенсатора  $\epsilon_\epsilon$ . Указанные погрешности могут быть компенсированы только за счет допуска замыкающего звена конструкторской цепи, а не выбором компенсатора. Поэтому их сумма не должна превышать допуска замыкающего звена конструкторской цепи  $TA_\Delta$ . На схеме компенсации эти погрешности, представляющие технологическую цепь, впишем в пределы  $TA_\Delta$ . Принимая допущение о симметричном распределении суммы этих погрешностей, совмещаем середину поля рассеяния суммарной погрешности с серединой поля допуска замыкающего звена конструкторской цепи. Половины слагаемых погрешностей изобразим на схеме компенсации отрезками справа и слева от этой середины. Для упрощения схемы компенсации сумма  $\epsilon_\Sigma$ ,  $\epsilon_{у\epsilon}$ ,  $\epsilon_u$  представлена на ней как погрешность формирования размера компенсатора  $\epsilon_{рк}$ .

С учетом случайного характера погрешностей сборки условие достижения точности замыкающего звена  $A_{\Delta}$ , можно записать следующим образом:

$$\dot{A}_{\Delta} \geq \sqrt{\varepsilon_y^2 + \varepsilon_{\dot{y}}^2 + \varepsilon_{\dot{e}}^2 + \varepsilon_{\dot{e}\dot{e}}^2 + \varepsilon_{\dot{a}}^2} \quad (2)$$

При внимательном выборе компенсатора невозможно ошибочно выбрать компенсатор, отличающийся от полости под него (измеренной при предварительной сборке) больше чем на одну ступень компенсации. Поэтому целесообразно принять  $c = \varepsilon_{\max}$ . Тогда

$$\tilde{n} = \sqrt{\dot{A}_{\Delta}^2 - \varepsilon_y^2 + \varepsilon_{\dot{y}}^2 + \varepsilon_{\dot{e}}^2 + \varepsilon_{\dot{e}\dot{e}}^2} \quad (3)$$

Число ступеней компенсации можно определить, поделив величину компенсации на ступень компенсации

$$N = \dot{A}_{\Sigma} / \tilde{n} = \dot{A}_{\Sigma} / \sqrt{(\dot{A}_{\Delta}^2 - \varepsilon_y^2 - \varepsilon_{\dot{y}}^2 - \varepsilon_{\dot{e}}^2 - \varepsilon_{\dot{e}\dot{e}}^2)} \quad (4)$$

Значение допусков составляющих звеньев конструкторской цепи и погрешностей сборочных работ и оснастки следует выбирать так, чтобы значение  $N$  получалось целым. Определение  $TA_{\Sigma}$  и  $c$  по правилу сложения случайных величин позволяет сократить число ступеней компенсации по сравнению с использованием арифметического сложения их составляющих.

На схеме компенсации разделим величину компенсации  $TA_{\Sigma}$  на части равные  $c$ . Так как желаемым значением  $A_{\Delta}$  является его среднее значение, то между серединами ступеней компенсации и серединой допуска  $TA_{\Delta}$  изобразим средние (в пределах их допусков) размеры компенсаторов разных ступеней.

Для отражения случайного характера  $A_{\Sigma}$  на схеме компенсации представлена кривая его нормального распределения.

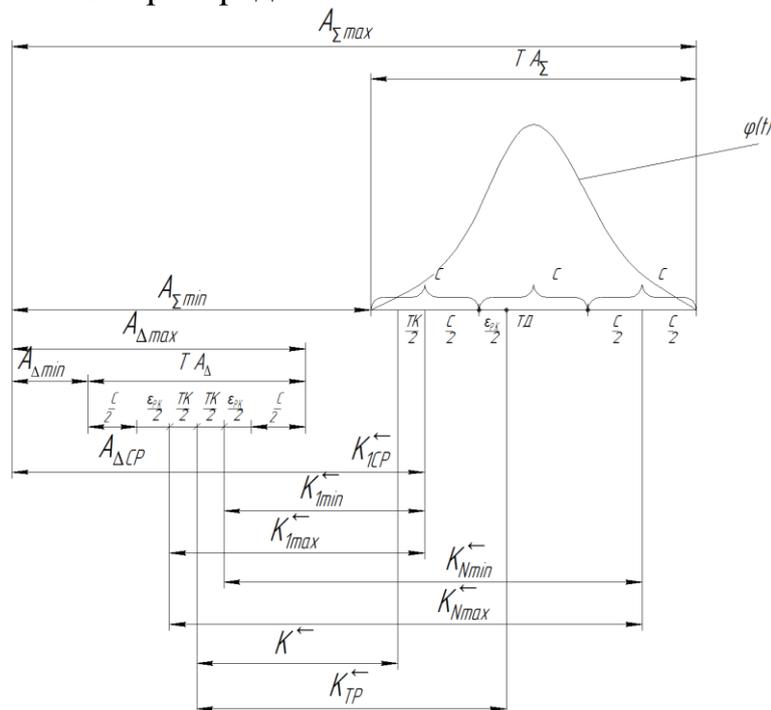


Рисунок – Схема компенсации поля рассеяния суммарного увеличивающего составляющего звена регулированием комплекта неподвижных уменьшающих компенсаторов разной толщины

В соответствии со схемой компенсации, принятой для случая использования комплекта уменьшающих компенсаторов разной толщины, среднюю толщину компенсатора первой ступени следует определять по формуле

$$\tilde{E}_{1\tilde{n}\tilde{\delta}} = \dot{A}_{\Sigma\tilde{n}\tilde{\delta}} - \dot{A}_{\Delta\tilde{n}\tilde{\delta}} - 3\sigma_{\Sigma} + c/2, \quad (5)$$

где:  $A_{\Sigma cp}$  – среднее значение суммарного составляющего звена;  $\sigma_{\Sigma}$  – среднеквадратическое отклонение суммарного составляющего звена;  $A_{\Delta cp}$  – среднее значение замыкающего звена конструкторской цепи.

Толщина компенсатора следующей ступени на  $c$  больше, чем толщина предыдущего.

Аналогично разработаны схемы компенсации и формулы для расчета размеров компенсаторов для двух других типовых сочетаний  $A_{\Sigma}$  и  $K$ .

Определяя число компенсаторов разных ступеней, предварительно изготавливаемых для партии собираемых изделий из  $P$  штук, при известном числе ступеней компенсации  $N$ , на производстве обычно исходят из того, что заранее неизвестно, компенсатор какой ступени потребуются для конкретного экземпляра изделия. Поэтому изготавливается комплект из  $N$  компенсаторов для каждого экземпляра изделия и общее число компенсаторов для всей партии  $Q = N \cdot P$ . Однако из каждого комплекта будет использован лишь один компенсатор, и  $(N-1) \cdot P$  компенсаторов окажутся лишними. При этом нет гарантии, что они потребуются в дальнейшем.

Снизить расходы на изготовление компенсаторов можно, если учесть, что суммарное составляющее звено в пределах партии собираемых изделий подчиняется нормальному закону распределения, при котором значения, близкие к середине поля рассеяния составляют подавляющее большинство, и, следовательно, компенсаторы крайних ступеней потребуются гораздо реже, чем компенсаторы средних ступеней.

Для определения доли экземпляров изделия, у которых  $A_{\Sigma}$  попадает в пределы каждой ступени компенсации, можно воспользоваться функцией Лапласа [3, 4]. Аргументом функции Лапласа  $\Phi(t)$  является коэффициент риска  $t$ , который в нашем случае можно определить делением интервала между серединой  $TA_{\Sigma}$  и границей определенной ступени компенсации на среднеквадратическое отклонение  $\sigma_{\Sigma} = TA_{\Sigma}/6$ .

Для первой и последней ( $N$ -й) ступеней компенсации коэффициент риска следует определять по формуле

$$t_1 = t_N = \frac{TA_{\Sigma}/2 - c}{\sigma_{\Sigma}} = \frac{3\sigma_{\Sigma} - 6\sigma_{\Sigma}/N}{\sigma_{\Sigma}} = 3 - \frac{6}{N}. \quad (6)$$

Значение функции Лапласа  $\Phi(t)$  для полученного аргумента  $t$  можно определить по специальной таблице [1, 2, 3]. Учитывая, что вероятность попадания значений  $A_{\Sigma}$  в половину поля его рассеяния равна 0,5 выражение для определения доли изделий с  $A_{\Sigma}$  в пределах первой и  $N$ -й ступени компенсации получим, вычитая из 0,5 значение  $\Phi(t_1)$ .

$$q_1 = q_N = 0,5 - \hat{O}(t_1) = 0,5 - \hat{O}\left(3 - \frac{6}{N}\right) \quad (7)$$

Доли изделий с  $A_{\Sigma}$  в пределах второй и  $N-1$ -ой ступени компенсации  $q_2, q_{N-1}$  получим вычитая из  $\Phi(t_1)$  значение  $\Phi(t_2)$ .

$$q_2 = q_{N-1} = \hat{O}(t_1) - \hat{O}(t_2) = \hat{O}\left(3 - \frac{6}{N}\right) - \hat{O}\left(3 - \frac{12}{N}\right) \quad (8)$$

В общем случае доли изделий с  $A_{\Sigma}$  в пределах  $i$ -ой и  $N-(i-1)$ -ой ступени компенсации

$$q_i = q_{N-i+1} = \hat{O}(t_{i-1}) - \hat{O}(t_i) = \hat{O}\left(3 - \frac{6 \cdot (i-1)}{N}\right) - \hat{O}\left(3 - \frac{6 \cdot i}{N}\right) \quad (9)$$

При четном числе ступеней компенсации расчеты долей изделий по формуле (15) следует выполнить для ступеней с номерами  $i \leq N/2$ , пока  $\Phi(t_i) \geq 0$ .

При нечетном числе ступеней  $N$  расчеты долей изделий по формуле (15) следует выполнить для ступеней с номерами  $1 \leq i \leq N/2 - 0,5$ . Доля изделий с  $A_{\Sigma}$  в пределах средней ступени компенсации с номером  $i = N/2 + 0,5$  по формуле

$$q_{N/2+0,5} = \hat{O}\left(\frac{3}{N}\right) \quad (10)$$

Число собираемых изделий, имеющих значение  $A_{\Sigma}$  в пределах отдельной ступени компенсации, можно определить как произведение соответствующей доли изделий на общее число изделий собираемой партии  $P$

$$Q_i = q_i \cdot P \quad \text{и} \quad Q_{N-i+1} = q_i \cdot P \quad (11)$$

Так как сумма долей компенсаторов всех ступеней равна  $0,9973 \approx 1$ , то общее число компенсаторов всех ступеней будет равно числу собираемых изделий в партии  $Q = P$ , следовательно предлагаемая методика расчета позволит сократить число требуемых компенсаторов в  $N$  раз ( $N$  – число ступеней компенсации), по сравнению с расчетом числа компенсаторов без учета распределения значений суммарного составляющего звена.

Применение предлагаемой методики на СТО «Брест» СООО «Белавтомас-сервис», при регулировке форсунки закрытого типа, с многодырчатым распылителем и гидравлически управляемой иглой позволило сократить число требуемых компенсаторов в 4 раза.

#### СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Маталин, А. А. Технология машиностроения: учебник / А. А. Маталин. – 5-е изд., стер. - Санкт-Петербург : Лань, 2020. – 512 с.
2. Соломахо, В. Л. Нормирование точности и технические измерения: учебник / В. Л. Соломахо, Б. В. Цитович, С. С. Соколовский. – Минск : Высшая школа, 2015. – 367 с.
3. Солонин, И. С. Расчет сборочных и технологических размерных цепей / И. С. Солонин, С. И. Солонин. – М. : Машиностроение, 1980 – 110 с.
4. Технология машиностроения (специальная часть): Учебник для машиностроительных специальностей вузов / А. А. Гусев [и др.] – М. : Машиностроение, 1986. – 480 с.