

УДК 621.757:658.56

**СТАНДАРТИЗАЦІЯ РАСЧЕТА СБОРОЧНЫХ РАЗМЕРНЫХ ЦЕПЕЙ  
В МАШИНОСТРОЕНИИ В УСЛОВИЯХ ТЕРМОВОЗДЕЙСТВИЯ**

**©Мельниченко А. А., Трищ А. Р., Черкашина О. С.**

*Українська інженерно-педагогічна академія*

**Інформація про авторів:**

**Мельниченко Олександр Анатолійович:** ORCID: 0000-0003-0648-2218; podoliak.09@rambler.ru; доктор технічних наук; професор кафедри металоріжучого обладання і транспортних систем; Українська інженерно-педагогічна академія; вул. Університетська, 16, м. Харків, 61003, Україна.

**Трищ Андрій Романович:** ORCID: 0000-0002-0012-4690; trisch\_redbull@mail.ru; аспірант кафедри охорони праці, стандартизації та сертифікації; Українська інженерно-педагогічна академія; вул. Університетська, 16, м. Харків, 61003, Україна.

**Черкашина Ольга Сергіївна:** ORCID: 0000-0002-5564-5100; olgacherkashina@mail.ru; кандидат технічних наук; асистент кафедри охорони праці, стандартизації та сертифікації; Українська інженерно-педагогічна академія; вул. Університетська, 16, м. Харків, 61003, Україна.

Установлено, что существующие межгосударственные, национальные, отраслевые нормативные документы регламентируют порядок, правила расчета сборочных размерных цепей при условии, что сборка выполняется в нормальных условиях, без учета влияния температуры. Целью работы является усовершенствование нормативного обеспечения процесса сборки многоэлементного соединения в условиях термовоздействия.

Выполнены теоретические исследования процессов, проходящие под действием температуры в зоне контакта сопрягаемой поверхности деталей при скреплении многоэлементного соединения. В результате влияния радиальных сил и сил сжатия на геометрические параметры деталей типа «вал-втулка» при соединении их нагревом была определена величина температурного зазора, образующиеся между элементами соединения в осевом направлении. Предлагается при расчете сборочных размерных цепей использовать математическую модель определения номинального значения замыкающего звена с учетом температурных зазоров.

Полученная математическая модель легла в основу создания нормативного обеспечения при определении номинального значения замыкающего звена с учетом различных материалов соединения деталей, температур и геометрических параметров сопрягаемых поверхностей.

**Ключевые слова:** температурный зазор; термовоздействие; точность сборки; многоэлементное соединение; размерная цепь; нормативное обеспечение.

**Мельниченко О. А., Трищ А. Р., Черкашина О. С.** «Стандартизація розрахунку складальних розмірних ланцюгів в машинобудуванні в умовах термовпливу».

Встановлено, що існуючі міждержавні, національні, галузеві нормативні документи регламентують порядок, правила розрахунку складальних розмірних ланцюгів за умови, що збірка виконується в нормальних умовах, без врахування впливу температури. Метою роботи є удосконалення нормативного забезпечення процесу складання багатоелементного з'єднання в умовах термовпливу.

Виконано теоретичні дослідження процесів, що проходять під дією температури в зоні контакту сполучається поверхні деталей при скріпленні багатоелементного з'єднання. В

результаті впливу радіальних сил і сил стиснення на геометричні параметри деталей типу «вал-втулка» при з'єднанні їх нагріванням, була визначена величина температурного зазору, що утворюються між елементами з'єднання в осьовому напрямку. Пропонується при розрахунку складальних розмірних ланцюгів використовувати математичну модель визначення номінального значення замикаючої ланки з урахуванням температурних зазорів.

Отримана математична модель лягла в основу створення нормативного забезпечення при визначенні номінального значення замикаючої ланки з урахуванням різних матеріалів з'єднання деталей, температур і геометричних параметрів поверхонь.

**Ключові слова:** температурний зазор; термовплив; точність складання; багатоеlementне з'єднання; розмірний ланцюг; нормативне забезпечення.

**Melnichenko A., Trich A., Cherkashyna O.** “Standardize the calculation of assembling dimensional chains in condition of machine-building of thermal influence within the sphere”.

It has been established that the existing intergovernmental, national, sectoral regulations regulate the procedure, the rules for calculating assembly dimension chains, provided that the assembly is carried out under normal conditions, without taking into account the effect of temperature. The aim is to ensure the improvement of the regulatory assembly process multi-element compound-heat conditions.

Theoretical study of the processes taking place under the influence of temperature in the contact area of the mating surfaces of the parts when fastening multi-element compounds. As a result, the influence of the radial forces and compression forces on the geometric parameters of parts such as “shaft-hub” when connecting their heating value has been determined the temperature gap between the elements formed axially compound. It is proposed in the calculation of assembly dimension chains use a mathematical model for determining the nominal value of the closing level, taking into account the temperature gaps.

The resulting mathematical model formed the basis for the creation of regulatory support in the determination of the nominal value of the closing level, taking into account a variety of materials joining parts, temperature and geometric parameters of the mating surfaces.

**Key words:** temperature gap; thermal influence; precision of the assembly; multielement compound; dimensional chain; regulatory support.

## **1. Постановка проблемы**

Перед тем как изделие будет направлено на изготовление и дальнейшую эксплуатацию, должен быть выполнен большой объём подготовительных работ связанных, в частности, с технологической подготовкой производства. Одним из основных элементов технологической подготовки производства является размерный анализ, который включает в себя, во-первых, разработку и анализ конструкций: определение и проверка необходимых и достаточных требований точности размеров, формы и взаимного расположения поверхностей, точности координации расположения отверстий. Во-вторых, разработку технологических процессов: расчеты номинальных и предельных значений технологических размеров, прогнозирование возможных значений припусков, назначение всех промежуточных размеров на обработку, вычисление оптимальной с точки зрения механической обработки простановки размеров. В-третьих, анализ технологических процессов сборки – это проверка собираемости сборочных единиц, комплектов, изделий; выбор вида сборки по уровню взаимозаменяемости, обеспечение заданных значений выходных характеристик изделия [1].

## **Технологія машинобудування**

---

Сборка является завершающей стадией изготовления машин и механизмов, во многом определяющей эксплуатационную надежность и долговечность изделия. Следует отметить, что основную часть сборочных работ составляют ручные слесарно-сборочные работы, требующие иногда больших затрат физического труда и высокой квалификации исполнителей. Поэтому экономические показатели предприятия во многих случаях зависят от трудоемкости сборочного производства, а проблема повышения качества и производительности сборки является одной из важнейших проблем научно-технического прогресса современного машиностроения.

В машиностроении одним из прогрессивных способов сборки является способ с термовоздействием, который заключается в нагреве детали типа «втулка», что после охлаждения приводит к скреплению с деталью типа «вал». Достоинством такого способа является получение соединения высокой прочности, исключение повреждений поверхности, а так же возможность автоматизации процесса сборки. Однако при использовании такого способа сборки особое значение приобретают вопросы обеспечения заданной точности соединений в осевом направлении.

### **2. Анализ исследований**

Как показали исследования, существующие межгосударственные, национальные, отраслевые нормативные документы регламентируют порядок, правила расчета размерных цепей при условии, что посадочный диаметр детали типа «втулка» гарантировано больше от посадочного диаметра типа «вал». Предлагаемая методика расчета применима только для одномерных размерных цепей, на что указывалось в [2-5], без учета определенных методов сборки. Но в случае сборки с термовоздействием в многоэлементном соединении между деталями после их охлаждения в осевом направлении появляются температурные зазоры, что приводит к нарушению размерной цепи сборочной единицы, а в некоторых случаях к невозможности процесса сборки. В связи с этим появилась актуальная задача усовершенствования нормативной базы расчета сборочных размерных цепей с учетом температурных зазоров, возникающих в процессе сборки в условиях термовоздействия.

### **3. Цель и задачи исследований**

Целью исследований является усовершенствование нормативного обеспечения процесса сборки многоэлементного соединения в условиях термовоздействия для получения заданных параметров качества.

Для реализации поставленной цели были сформулированы следующие задачи:

1. Проанализировать влияние радиальных сил и сил сжатия на геометрические параметры деталей типа «вал-втулка» при соединении их нагревом. Определить величину температурных зазоров, которые образуются между элементами соединения в осевом направлении.
2. Получить математическую модель определения номинального значения замыкающего звена с учетом величины температурных зазоров между элементами соединения.

### **4. Определение величины температурных зазоров в осевом направлении при сборке с термовоздействием**

Рассмотрим соединение двух охватываемых деталей формируемое с использованием нагрева. В процессе сборки сопрягаемых деталей обе втулки остывают, их размеры уменьшаются, а посадочные поверхности втулок скользят по посадочной поверхности вала. При этом на втулку

одновременно действуют радиальные силы и силы сжатия, обусловленных соответственно внутренним контактным давлением в результате натяга и температурными деформациями, вследствие чего происходит изменение размеров втулок в сторону уменьшения (рисунок 1).

Под воздействием постоянной радиальной силы (рис. 1) перемещение  $\Delta_n$  торцевой поверхности втулок можно определить по формуле, которая получена на основании решения дифференциального уравнения, описывающего плоское напряженное состояние полого цилиндра.

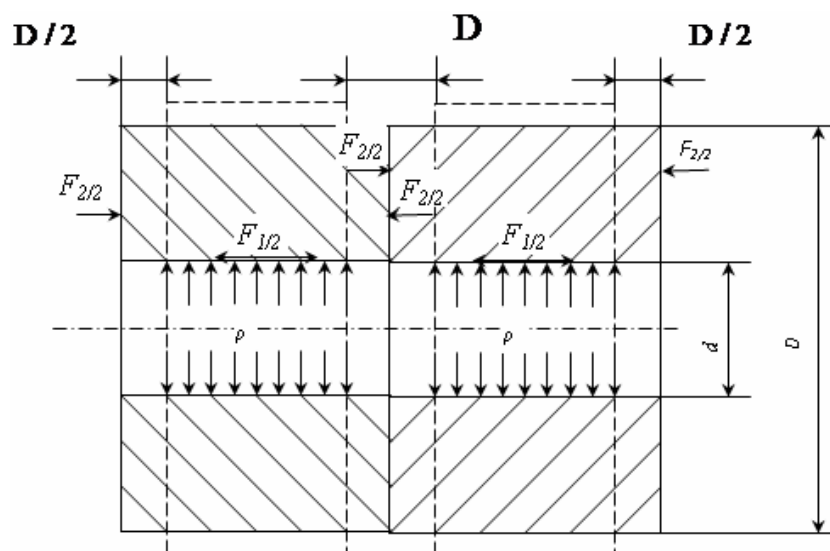


Рис. 1 – Схема изменения размеров многоэлементного соединения

$$\Delta_{BT} = \frac{2\mu\rho Ad}{E(D^2 - d^2)}, \quad (1)$$

где  $\mu$  – коэффициент Пуассона;

$\rho$  – контактное давление на посадочной поверхности, МПа;

$E$  – модуль упругости, МПа.

Для деталей из одинакового материала

$$\rho = -\frac{NE(D^2 - d^2)}{2D^2d}$$

Получаем

$$\Delta_{BT} = -\mu N \frac{Ad}{D^2}. \quad (2)$$

Анализ формулы (1) показывает, что при воздействии контактного давления  $\rho$  втулка будет сужаться в осевом направлении. В процессе остывания при соединении втулка обменивается теплом с валом и окружающей средой. Если считать, что тепло, переданное валу за время скрепления, не успевает распространиться по всей его массе, а сосредотачивается в части вала по посадочной поверхности, то можно записать

$$c_B m_B T_B + c_{BT} m_{BT} T_{BT} = (c_B m_B + c_{BT} m_{BT}) = const,$$

где  $T_B$  и  $T_{BT}$  – текущая температура вала и втулки в любой момент времени  $t$  процесса скрепления;

**Технологія машинобудування**

$T_\phi$  – температура деталей соединения по окончании формирования натяга.

Остывание нагретого тела происходит по экспоненциальному закону

$$T_{BT} - T_B = (T'_{BT} - T'_B) e^{-k\tau}, \quad (3)$$

где  $T'_{BT}$  и  $T'_B$  – начальные температуры втулки и вала перед сборкой;

$k$  – коэффициент, который зависит от теплофизических свойств материалов втулки, вала и контактной зоны деталей, а также от массы собираемых деталей.

В момент времени  $\tau$  уменьшение длины втулки от изменения ее температуры будет определяться

$$\Delta' = \beta_{BT} A (T_{BT} - T_B). \quad (4)$$

Величина натяга в любой момент времени определяется

$$N_\tau = \beta_{BT} d [(T'_{BT} - T'_B) - (T_{BT} - T_B)]. \quad (5)$$

Из уравнения (3) и (4) получим

$$\Delta' = \beta_{BT} A \frac{T_{ck} c_B m_B}{c_B m_B + c_{BT} m_{BT}} e^{-k\tau}, \quad (6)$$

$$N_\tau = N (1 - e^{-k\tau}), \quad (7)$$

где  $T_{ck}$  – температура втулки в момент окончания скрепления.

В момент времени  $\tau$  сила трения  $F_1$  между посадочными поверхностями втулки и вала компенсирует силу  $F_2$  температурной деформации втулки, проскальзывание поверхностей деталей завершается (рис. 2).

Условия торможения деформации

$$F_1 \geq F_2 \quad \text{т.е.} \quad f_c \rho S_o \geq \frac{\Delta'}{A} SE, \quad (8)$$

где  $S_o$  – номинальная площадь сопряжения;

$S$  – площадь торца втулки.

Из уравнения (7) (8) получаем

$$\Delta' = \frac{2fA^2 N \frac{c_B m_B}{c_B m_B + c_{BT} m_{BT}}}{2fA d + D^2 \frac{c_B m_B}{c_B m_B + c_{BT} m_{BT}}}$$

С учетом уравнения (1) уравнение общего осевого удлинения втулки после ее скрепления с валом имеет вид

$$\Delta_o = \Delta_{BT} + \Delta' = \frac{AdN}{D^2} \left( \frac{2f_c AB}{2f_c A + dB} - \mu \right), \quad (9)$$

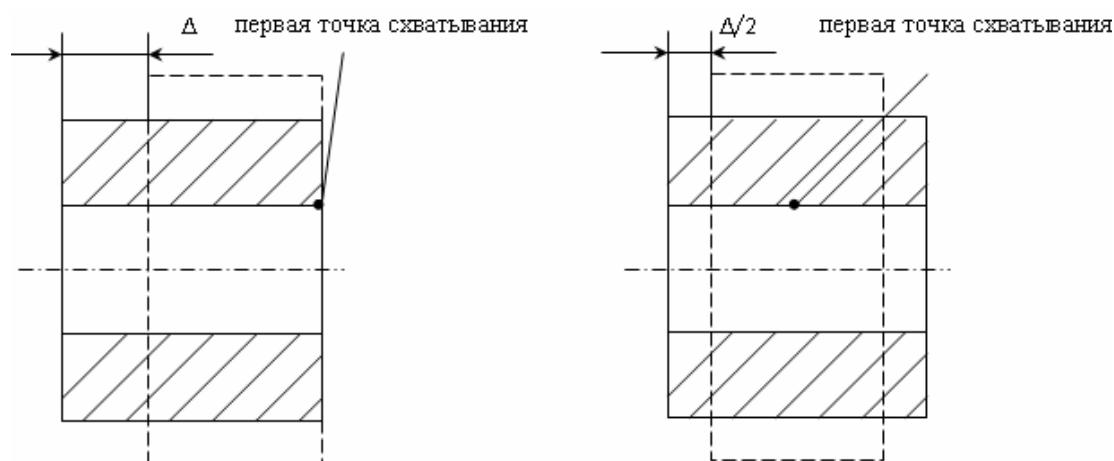
где  $B = \frac{c_B}{c_B d^2 + c_{BT} (D^2 - d^2)}$ .

Зазор между втулками многоэлементного соединения образуется из половин начальной температурной деформации и конечного общего осевого удлинения каждой из втулок после ее скрепления, и равен

$$\Delta = 0,5(\beta_{BT}AT_{BT} + \Delta_o). \quad (10)$$

При скреплении двух посадочных поверхностей целесообразно учитывать, так называемую, первую точку схватывания.

Первая точка схватывания является случайной величиной. Так как ее расположение по посадочной поверхности зависит от случайных факторов: чистоты поверхности охватывающей и охватываемой деталей; равномерности температуры нагрева; отклонения формы и т.д. Предполагается, что изменение расположения первой точки схватывания происходит по нормальному закону распределения. Величина получаемого зазора зависит от расположения первой точки схватывания и лежит в пределах от 0 до  $(\beta_{BT}AT_{BT} + \Delta_o)$  (рис. 2).



**Рис. 2** – Влияние первой точки схватывания на величину зазора

Так как при сборке с нагревом избежать образования зазора без дополнительных технологических или конструкторских решений невозможно. Поэтому в многоэлементном соединении при расчете сборочных размерных цепей для уменьшения погрешности получения значения замыкающего звена целесообразно учитывать дополнительную величину  $(\beta_{BT}AT_{BT} + \Delta_o)$ .

Моделирование тепловых процессов, которые проходят при сборке с термовоздействием, и знание закона распределения изменения величины температурных зазоров, дает возможность управлять связями, образующимися между поверхностями деталей. Раньше, что бы исключить неизбежные зазоры прибегали к специальным способам. Существующий способ прижима деталей друг к другу в процессе скрепления трудоемок и требует прессового оборудования. Крупногабаритными же соединениями манипулировать очень сложно и не всегда на производстве имеются большие прессы. На основании проведенного анализа процесса формирования многоэлементного соединения в осевом направлении для исключения зазоров, впервые предлагается использовать полученную величину температурного зазора в расчете сборочных размерных цепей.

**Технологія машинобудування**

Математическая модель расчета сборочной размерной цепи имеет вид

$$A_{\Delta} = \sum_{i=1}^n \left( \xi_{A_i} A_i - \left( \beta_{BT_i} l_{BT_i} T_{BT_i} + \Delta_{o_i} \right) \right), \quad (11)$$

где  $A_{\Delta}$  – номинальный размер замыкающего звена размерной цепи;

$A_i$  – номинальный размер составляющего звена размерной цепи;

$\xi_{A_i}$  – передаточное отношение  $i$  – звена, которое может принимать разное содержание и значение в зависимости от вида размерной цепи.

Полученное номинальное значение замыкающего звена позволяет уменьшить суммарную погрешность сборки на этапе технологической подготовки производства без использования дополнительных технологических операций.

**Выводы**

1. Анализ процессов, проходящих при сборке деталей типа «втулка» и «вал» в условиях термовоздействия методом нагрева, показал, что возникающие температурные зазоры значительно снижают точность сборки, особенно при многоэлементных соединениях.

2. На этапе технологической подготовки производства при расчете сборочных размерных цепей предлагается номинальное значение замыкающего звена определять по формуле (11), что позволяет выполнить сборочные операции без дополнительных конструкторских и технологических решений.

**Список использованных источников:**

1. Размерный анализ технологических процессов / В. В. Матвеев, М. М. Тверской, Ф. И. Бойков и др. – М. : Машиностроение, 1982. – 264 с.
2. ГОСТ 16319-80. Термины, обозначения и определения размерных цепей. – Введ. с 01.01.81. – М. : Изд-во стандартов, 1990. – 32 с.
3. ГОСТ 16320-80. Методы расчета конструкторских, технологических и измерительных плоских размерных цепей. – Введ. с 01.01.81. – М. : Изд-во стандартов, 1990. – 29 с.
4. ГОСТ 19415-74. Цепи размерные. Методы расчета коэффициентов относительной асимметрии и относительного рассеяния замыкающего звена. – Введ. с 01.01.75. – М. : Изд-во стандартов, 1990. – 26 с.
5. ГОСТ 21495-76. Базирование и базы в машиностроении. Термины и определения. – Введ. с 01.01.77. – М. : Изд-во стандартов, 1990. – 35 с.

**References**

1. Matveev, V, Tverskoy, M & Boykov, F 1982, *Razmernyy analiz tekhnologicheskikh protsessov*, Mashinostroyeniye, Moskva.
2. Gosudarstvennyy komitet SSSR po standartam 1981, *Terminy, oboznacheniya i opredeleniya razmernykh tsepey*, GOST 16319-80, Izdatelstvo standartov, Moskva.
3. Gosudarstvennyy komitet SSSR po standartam 1981, *Metody rascheta konstruktorskikh, tekhnologicheskikh i izmeritelnykh ploskikh razmernykh tsepey*, GOST 16320-80 Izdatelstvo standartov, Moskva.
4. Gosudarstvennyy komitet SSSR po standartam, *Tsepi razmernyye. Metody rascheta koeffitsientov odnositelnoy asimmetrii i odnositlnogo rasseyaniya zamykayushchego zvena*, GOST 19415-74, Izdatelstvo standartov, Moskva.
5. Gosudarstvennyy komitet SSSR po standartam, *Bazirovaniye i bazy v mashinostroyenii. Terminy i opredeleniya*, GOST 21495-76, Izdatelstvo standartov, Moskva.

Стаття надійшла до редакції 14 листопада 2016 р.