

УДК 621.9-18

РАЗРАБОТКА ТЕОРИИ ТЕПЛОВЫХ СМЕЩЕНИЙ, ПОЗВОЛЯЮЩЕЙ СИСТЕМНО АНАЛИЗИРОВАТЬ ВЛИЯНИЕ ФАКТОРОВ НА ТОЧНОСТЬ ОБРАБОТКИ НА СТАНКЕ

Светлана Валерьевна Лаврова, Константин Александрович Герасимов

*Студенты 5 курса,
кафедра «Металлорежущие станки»,
Московский государственный технический университет имени Н.Э. Баумана*

*Научный руководитель: А.Г. Ширшов,
аспирант первого года обучения, кафедра «Металлорежущие станки»,
Московский государственный технический университет имени Н.Э. Баумана*

1. Введение.

В области станкостроения наблюдается постоянное ужесточение требований к точности обработки на станках. Станки должны быть точнее и производительнее, что является главным их функциональным качеством. В связи с этим перед инженерами встаёт задача поиска новых решений в конструкции, технологии обработки, сборки, автоматизированном управлении станком.

Наибольший потенциал в повышении точности станков даёт расчёт и анализ точности работы конструкции на стадии проектирования, потому что эта работа открывает наибольшие возможности по воздействию на факторы, снижающие точность обработки. Остальные методы повышения точности станка, основанные на технологии обработки, особенностях управления станком и т.д., ограничены в возможностях повышения точности станка физическими свойствами самой конструкции станка.

В настоящее время процесс проектирования конструкции не связан с точностью самого станка. Применяемые расчёты по большей части мало обоснованы. Как результат, создание конструкции станка и назначение требований к деталям и сборкам происходит в значительной степени или интуитивно, или на базе эмпирического опыта. Использование мощных пакетов конечно-элементного анализа типа Ansys, Nastran, Patran по сути позволяет заменить физический эксперимент виртуальным. Станок для инженера по-прежнему остаётся «чёрным ящиком», и повышение точности в таком случае остаётся интуитивным.

При расчёте точности на стадии проектирования и анализе влияния различных факторов и свойств конструкции на точность обработки крайне важен системный подход к конструкции. Необходима теория, которая представит станок как систему факторов, что позволит оценивать удельное влияние каждого фактора на точность станка и увязать процесс проектирования с обеспечением точности станка.

Согласно [1], статическую точность станков определяют три основные характеристики смещений: силовая, тепловая и размерная. Для силовой составляющей точности уже существует теория силовых смещений [1], в которой конструкция станка приводится к упруго-фрикционной системе — системе упругих и неупругих свойств конструкции, значения которых определяются шероховатостью стыков, усилиями затяжки, жёсткостью деталей и т.д.

2. Цели и задачи исследования.

В данном исследовании поставлена задача - разработать и обосновать теорию тепловых смещений в станке. В настоящее время существует множество работ, посвящённых расчёту тепловых смещений станков на стадии их проектирования. Работы последних лет преимущественно связаны с методом конечным элементов. С одной стороны, можно достаточно точно определить тепловую точность станка, построить поле температур, распределения тепловых смещений. Однако станок для инженера по-прежнему остаётся «чёрным ящиком», потому что удельное влияние отдельных факторов практически не определяется. Разрабатываемая теория должна связать отдельные факторы, влияющие на тепловые смещения, в систему. Т.к. силовые и тепловые процессы в реальной конструкции работают вместе, необходимо связать теорию силовых и тепловых смещений в единое целое.

3. Физическая картина формирования тепловых смещений.

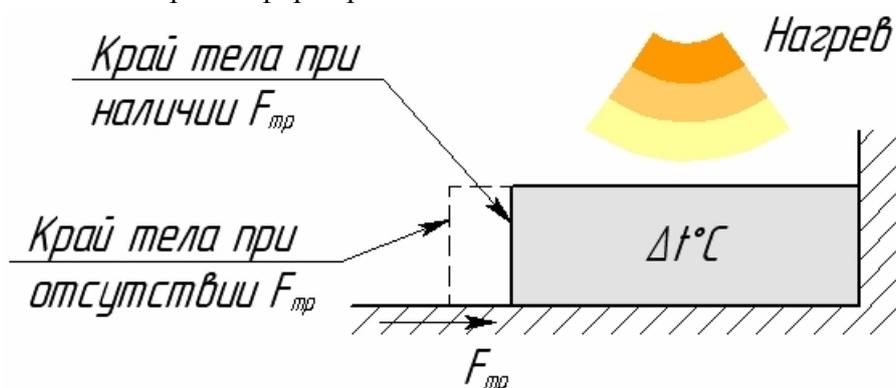


Рис. 1. Схема для анализа процесса формирования тепловых смещений в станке

Рассмотрим тело, которое лежит в углу некоторого недеформируемого основания (рис. 1). Левый край - свободное состояние, правый – касается стенки без усилия. Жёсткость тела в горизонтальном направлении – k . Пусть тело прижимается нижней плоскостью к основанию нормальной силой N . Будем равномерно медленно нагревать и охлаждать тело (график изменения температуры представлен на рис. 2). Нагрев и охлаждение тела происходит с низкой скоростью, чтобы процессы в системе носили статический характер. График изменения температуры тела представлен на рис. 2.

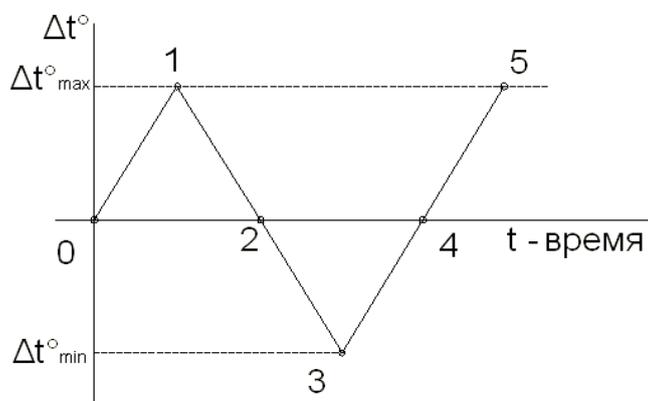


Рис. 2. График изменения температуры тела

По мере нагрева свободный край тела начинает смещаться. При движении левого края тела в стыке появляется сила трения, которая направлена против движения (вправо). Согласно третьему закону Ньютона, сила трения $F_{тр}$ должна быть уравновешена силой, равной ей по величине и направленной противоположно ей. Т.к. сила трения деформирует тело, уравновешивающей силой будет сила упругости $F_{упр}$ тела.

$$F_{упр} = F_{тр} \quad (1)$$

Таким образом, при нагреве тела появляются сразу две силы – $F_{тр}$, $F_{упр}$. Вначале при нагревании тела сила трения, сила упругости и сжатие тела будут увеличиваться. При этом край тела останется неподвижным, т.к. сжатие тела будет равно величине его удлинения вследствие нагрева. При достижении силой трения величины T , и при дальнейшем росте температуры величина силы трения останется неизменной. Сила упругости согласно третьему закону Ньютона, останется равной уже постоянной по величине силе трения. Следовательно, начиная с момента достижения силой трения величины T дальнейшее удлинение тела не встречает препятствий, и тело будет удлиняться так, как будто силы трения и силы упругости нет. Однако при этом тело будет оставаться в сжатом состоянии.

Рассчитаем значения силы трения $F_{тр}$ и силы упругости $F_{упр}$. Если бы не было силы трения, удлинение тела Δl при тепловом расширении составило бы:

$$\Delta l = \alpha \cdot l_0 \cdot \Delta t \quad (2)$$

где Δl – удлинение тела при нагреве (охлаждении), мм
 α – коэффициент линейного расширения материала тела, $^{\circ}\text{C}^{-1}$
 l – начальная длина тела, мм
 Δt^0 – изменение температуры тела, $^{\circ}\text{C}$

Так как сила трения препятствует движению края тела, тело оказывается сжатым на Δl . Тогда сила упругости будет равна:

$$F_{упр} = k \Delta l \quad (3)$$

где k – жесткость тела, Н/мм

Определим температуру, при которой наступают смещения тела. При указанной температуре сила трения достигает максимального значения:

$$F_{тр} = T \quad (4)$$

Используя уравнение (1), (2) и (3), получим:

$$\Delta t_T = \frac{T}{\alpha l_0 k} \quad (5)$$

На рис. 3 представлена зависимость смещений тела от величины его нагрева. Представленная графическая зависимость получила название характеристики тепловых смещений (ХТС) по аналогии с характеристикой силовых смещений из теории силовых смещений.

Участок 0-1 ХТС описывает смещения в начале нагрева. Как было сказано выше, край тела не смещается пока $\Delta l \cdot k < T$.

Участок 1-2 ХТС описывает смещения тела, когда $\Delta l \cdot k \geq T$. Для определения величины нагрева Δt_T^0 , при котором участок 0-1 ХТС переходит в участок 1-2, то есть начинается процесс смещения левого края тела.

Далее температура тела уменьшается, при этом тело начинает укорачиваться в длину. Однако, в связи с тем, что оно было сжатым (под действием силы трения в

стыке), то сначала уменьшается степень сжатия тела $\Delta l \cdot k$. При этом сила упругости и сила трения уменьшаются при уменьшении степени сжатия тела.

Процесс снятия напряжений в детали отображается на участке 2-3 ХТС. Точка 3 соответствует ненапряженному состоянию тела, когда $F_{упр} = k \cdot 0 = 0$ и $F_{упр} = F_{тр} = 0$. Участок 3-0-7 характеризует процесс тепловых смещений при отсутствии силы трения, показан пунктиром потому, что реальная система (рис. 1) имеет трение. При дальнейшем уменьшении температуры тела процесс, описанный выше, повторяется с тем отличием, что смещения уменьшаются, а тело, под действием внешней силы трения оказывается растянутым.

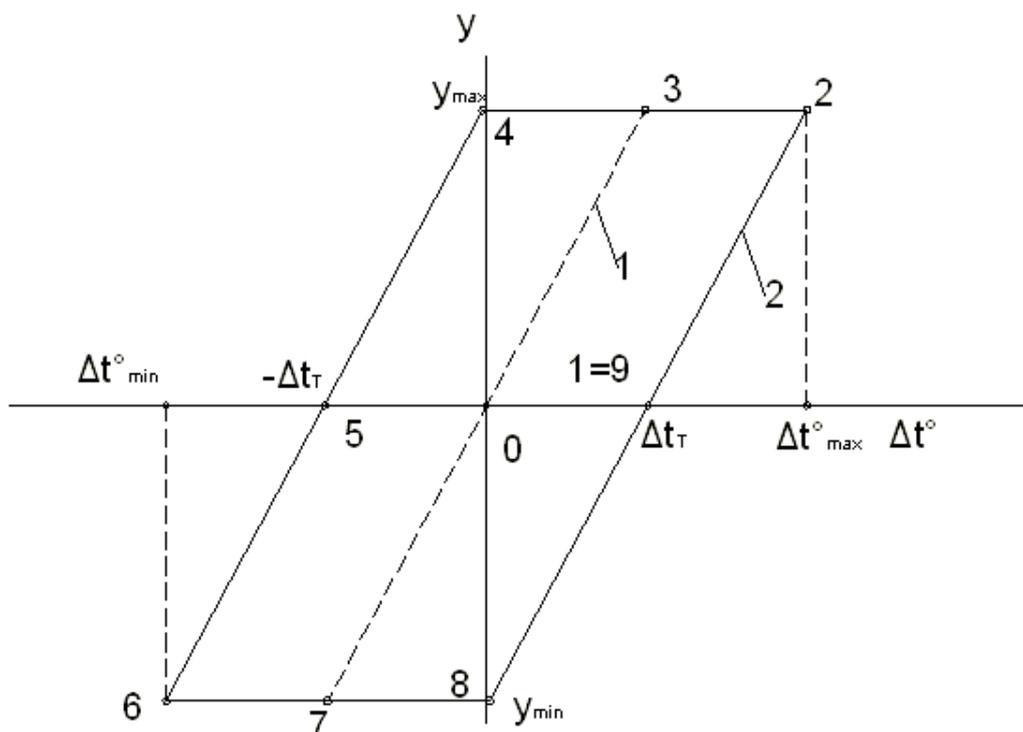


Рис. 3. Характеристика тепловых смещений

4. Методика построения ХТС.

Методика построения ХТС основана на том, что край тела находится в покое, когда силы трения и упругости равны между собой, и смещается, когда сила трения достигает максимальной величины T .

Исследование процесса смещения тела при тепловом нагружении и наличии стыка показало, что величина смещения состоит из двух составляющих:

$$y = \frac{F_{упр}}{k} + \Delta l \quad (6)$$

Т.к. сила упругости равна силе трения (см. уравнение (1)), представим уравнение (6) в следующем виде:

$$y = \frac{F_{тр}}{k} + \Delta l \quad (7)$$

Сила трения изменяется по следующему закону:

$$F_{\text{тр}} = \begin{cases} \Delta l \cdot k, & \Delta l \cdot k \leq T \\ T, & \Delta l \cdot k > T \end{cases} \quad (8)$$

При этом следует выделить следующий момент: край тела может либо двигаться, либо оставаться неподвижным. Когда край тела движется, сила трения равна T , в остальных случаях край тела остаётся неподвижным. Из такой особенности поведения системы следует методика построения ХТС.

При построении ХТС сначала выделяется область существования графика. Т.к. сила трения не может превысить T , а зависимость (6) при $F_{\text{тр}} = T$ носит линейный характер, то на оси температуры отмечаем точки с координатами $(\pm \Delta t_{\text{т}}, 0)$. Через эти точки проводим прямые, параллельные прямой $y = \frac{T}{k}$. В результате получим три области: в середине и границы — область существования ХТС, слева и справа — недопустимая область. На границе области существования графика сила трения = T , следовательно, только точки на границе соответствуют движению края тела. Точки внутри области существования соответствуют состоянию тела, при котором его край неподвижен.

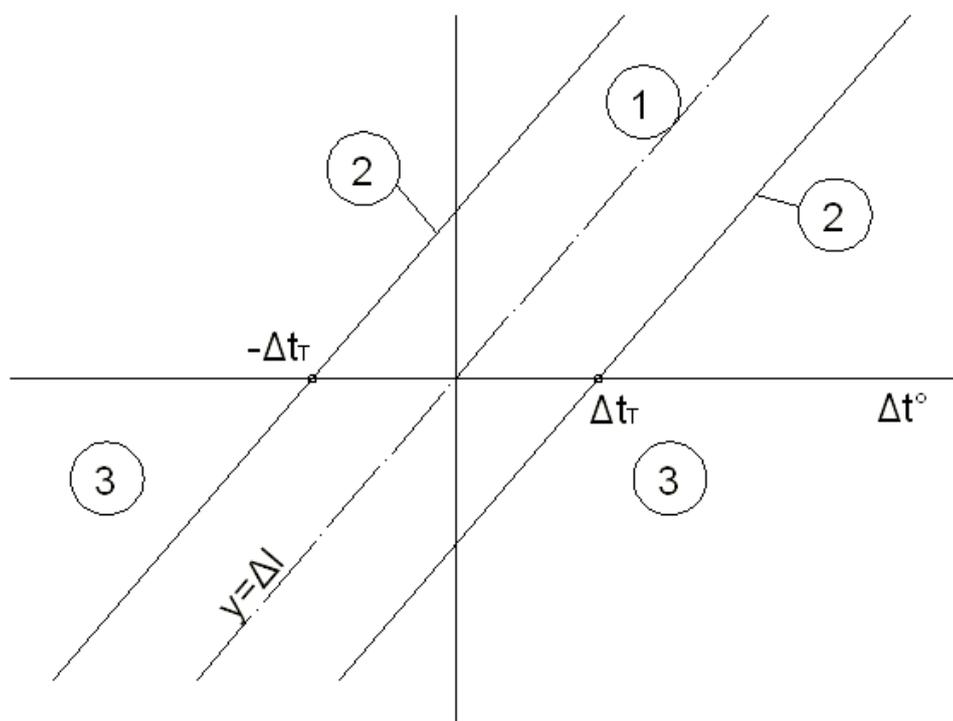


Рис. 4. Области существования характеристики тепловых смещений тела

Пусть у нас есть некоторая точка, к которой мы пришли в результате определённой последовательности тепловой нагрузки и разгрузки. И стоит задача определить поведение края тела при увеличении или уменьшении степени нагретости тела.

Чтобы ответить на поставленный вопрос, необходимо через указанную точку провести горизонтальную прямую до пересечения с границами области существования ХТС. Данная линия характеризует отсутствие смещений при нагревании или охлаждении тела, когда выполняется условие $\Delta l \cdot k < T$. От точек пересечения данной

линии с границами области существования ХТС сносим вертикальные линии на ось температуры — получаем $\Delta t_{\min}^0 \dots \Delta t_{\max}^0$. Эти две линии определяют область на оси температуры, нагрев и охлаждение в пределах которой не вызывает смещения края тела. При дальнейшем повышении или понижении температуры график пойдёт соответственно вверх и вниз.

В итоге можно записать следующий алгоритм расчёта смещений при тепловом нагружении:

$$\begin{aligned} \Delta t_{\min} < \Delta t < \Delta t_{\max}^0 &\rightarrow \Delta y = 0, \\ \Delta t < \Delta t_{\min}^0 &\rightarrow y = \frac{T}{k} + \Delta l, \\ \Delta t > \Delta t_{\max}^0 &\rightarrow y = \frac{-T}{k} + \Delta l. \end{aligned} \quad (9)$$

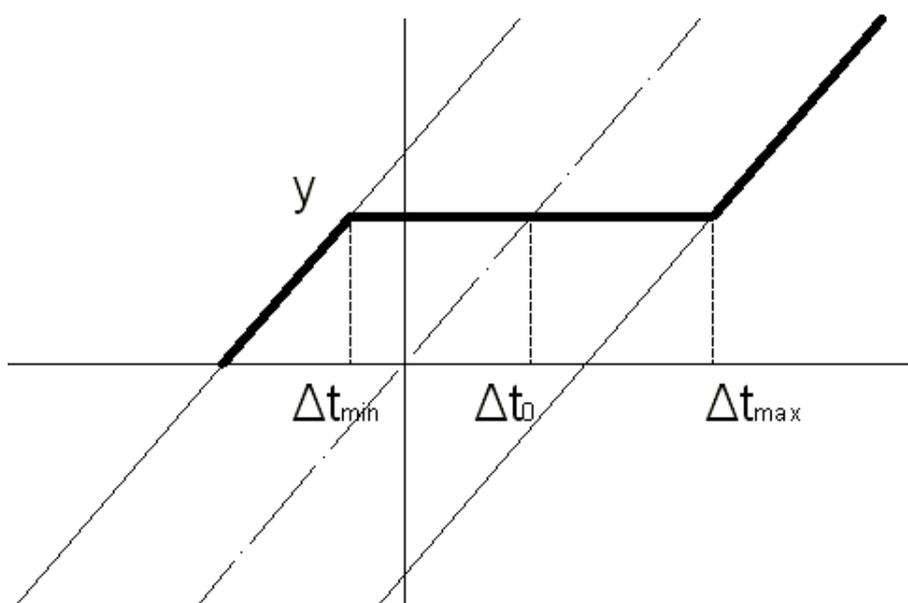


Рис. 5. Этапы построения характеристики тепловых смещений

5. Выводы.

При анализе поведения системы было замечено много схожего с процессом формирования силовых смещений. На основании данной схожести, а также в результате анализа процесса формирования смещения при тепловом нагружении и наличии стыков были сделаны следующие выводы.

1. При наличии стыков тепловые процессы сопровождаются как тепловыми, так и силовыми смещениями.
2. Суммарное смещение при нагреве тела складывается из суммы силовых и тепловых смещений (см. уравнение).
3. Сила трения будет влиять на суммарное смещение при тепловом нагружении.
4. Так как сила трения $F_{тр} = \Delta l \cdot k$ жесткость конструкции влияет на суммарное смещение при тепловом нагружении.
5. Так как вибрации влияют на $F_{тр}$, то наличие вибрации будет влиять на суммарное смещение u_{max} — увеличивать и уменьшать $2\Delta t$ (на рис. 3) благодаря связи тепловых смещений с силой трения.

6. При нагреве – участок 0-1-2 рис. 2 – возникают остаточные тепловые смещения, не связанные с наличием зазоров в системе.
7. С течением времени остаточные тепловые смещения могут быть сняты двумя путями - $\Delta t^{\circ}\text{C}\downarrow$ и вибрации ($F_{\text{тр}}\downarrow$) – практическая важность работы по исследованию.
8. Поведение силы трения не зависит от природы смещения тела.
9. Теорию тепловых явлений нельзя рассматривать без теории силовых смещений.

Литература

1. *Чернянский П.М.* Основы проектирования точных станков. Теория и расчёт. - М.: КНОРУС, 2010. - 240 стр.
2. *Яворский Б.М., Детлаф А.А.* Справочник по физике. М.: Наука, 1977.
3. *Кузнецов А.П.* Тепловое поведение и точность металлорежущих станков. -М.: МГТУ Станкин, Янус-К, 2011, -256с.