

УДК 621.892

ПОСТРОЕНИЕ РЕГРЕССИОННОЙ МОДЕЛИ ТЕРМИЧЕСКОГО СОПРОТИВЛЕНИЯ КОНТАКТНОЙ ПСЕВДОСРЕДЫ

© 2021 А.Ф. Денисенко, Л.Ю. Подкругляк

Самарский государственный технический университет

Статья поступила в редакцию 10.06.2021

Опыт эксплуатации металлорежущих станков позволил выработать обоснованные рекомендации допустимых предельных значений температуры для основных подсистем станка, определяющих точность обработки. Однако, снижение серийности выпускаемого металлорежущего оборудования и постоянное совершенствование его конструкций требуют разработки моделей, являющихся основой инженерных методик, позволяющих на этапе проектирования прогнозировать тепловую картину основных узлов станка, влияющих на точность обработки. В связи со значительным числом факторов, влияющих на формирование контактного термического сопротивления, и различием весомости их действия предложено для их всестороннего учета в тепловой модели соединения деталей использовать псевдослой (псевдосреду), состоящий из площадок фактического контакта и полостей, заполненных воздухом или маслом. Для определения значимых факторов, оказывающих доминирующее влияние на контактное термическое сопротивление, был проведен ряд однофакторных экспериментов. Для разработки регрессионной модели изменения температуры в зоне контакта был выполнен ПФЭ типа 2⁴. Полученные результаты были проверены по критериям Кохрена, Стьюдента и Фишера.

Ключевые слова: контактное термическое сопротивление, номинальная площадь контакта, фактическая площадь контакта, псевдосреда, конечно-элементная модель, полный факторный эксперимент, регрессионная модель.

DOI: 10.37313/1990-5378-2021-23-3-47-54

ВВЕДЕНИЕ

Значительная доля тепловой погрешности от общей погрешности изготовления при металлообработке (40...70%) требует постоянного совершенствования методик, позволяющих учесть этот фактор при проектировании металлорежущих станков.

Опыт эксплуатации металлорежущих станков позволил выработать обоснованные рекомендации допустимых предельных значений температуры для основных подсистем станка, определяющих точность обработки. Однако, снижение серийности выпускаемого металлорежущего оборудования и постоянное совершенствование его конструкций требуют разработки моделей, являющихся основой инженерных методик, позволяющих на этапе проектирования прогнозировать тепловую картину основных узлов станка, влияющих на точность обработки.

Моделирование протекания тепловых потоков в конструкции металлорежущего станка затруднено в связи с большим количеством источников тепла (электродвигатели, подшипники качения, зона резания, зубчатые и ременные передачи, гидравлическая система и т.д.) и большим числом деталей, входящих в их конструкцию. По-

следнее обстоятельство вызывает необходимость учета в тепловой модели прохождения тепловых потоков от источников не только через сплошные детали, но, в значительной степени через контакты деталей между собой [1, 2].

Прохождение теплового потока через реальные контактирующие поверхности деталей сильно отличается от его движения через идеальный стык, когда тепловой поток практически не встречает значительного сопротивления на своем пути. В реальных стыках за счет наличия макроотклонений, волнистости и шероховатости, которые зависят от структуры и характера технологической обработки, нарушается сплошной контакт по соединению. Это приводит к возникновению контактного термического сопротивления (КТС), которое необходимо учитывать в используемых тепловых моделях.

Таким образом, необходимость обоснованно управлять тепловыми потоками в особо точных узлах металлорежущих станков за счет конструкторских и технологических мероприятий делают задачу формирования КТС весьма актуальной.

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ПСЕВДОСРЕДЫ ДЛЯ МОДЕЛИРОВАНИЯ КТС

Моделирование распространения тепловых потоков в узлах МРС с использованием крупноблочных конечных элементов [1] с учетом на их границах контактного термического сопротивления (КТС) дает возможность существенно

*Денисенко Александр Федорович, доктор технических наук, профессор кафедры «Технология машиностроения, станки и инструменты». E-mail: sammortor@yandex.ru
Подкругляк Любовь Юрьевна, аспирант.
E-mail: podkruglak@mail.ru*

упростить составление модели, что особенно важно на этапе проектирования и анализа различных вариантов конструкции узла. Кроме того, такая модель позволяет оценить наряду с вариантами конструкции, связанными в первую очередь с формой и размерами неподвижных соединений, влияние требований качества контактирующих поверхностей, определяемых отклонениями сопрягаемых поверхностей от идеальной формы.

Проведенные ранее исследования рядом авторов [3...10] показали, что условия контактирования весьма существенно сказываются на прохождении теплового потока в конструкциях станков.

При исследовании сложных процессов, как правило, приходится сталкиваться с действием большого числа факторов. Так, например, в работе [3] приводятся зависимости термического сопротивления контакта, учитывающие среднее квадратическое отклонение профиля; твердость (микротвердость) поверхности; средний тангенс угла наклона шероховатости; максимальный радиус закругления вершин выступов; параметр, характеризующий степень механической нагруженности неровностей контакта.

Значительное число действующих факторов и различие степени влияния и весомости их действия приводят к выводу, что для их всестороннего учета в тепловой модели в соединении деталей следует расположить псевдослой (псевдосреду), обладающий рядом характеристик.

Поскольку современная теория контактирования поверхностей базируется на положении, что наличие шероховатости, волнистости и макроотклонений приводит к дискретности их взаимодействия, то псевдосреда, должна представлять слой, состоящий из площадок фактического контакта и полостей, заполненных воздухом или маслом.

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ЗНАЧИМЫХ ФАКТОРОВ ПРИ МОДЕЛИРОВАНИИ КТС И ДИАПАЗОНОВ ИХ ВАРЬИРОВАНИЯ

Был проведен ряд однофакторных экспериментов, позволивших выделить существенные факторы, влияющие на контактное термическое сопротивление.

Без выполнения этой процедуры общепринятые методики (например, регрессионный анализ) при большом числе факторов становятся неприемлемыми, так как требуют большого числа экспериментов.

Однофакторные эксперименты по оценке характеристик псевдосреды на контактное термическое сопротивление проводились на конечноэлементной модели контактирования двух квадратных пластин (0,02 м x 0,02 м) толщиной

1 мм (рис. 1), в зоне контакта которых располагается псевдосреда. Материал пластин - сталь (коэффициент теплопроводности $\lambda = 50$ Вт/(м·К)). Мощность каждого из пяти источников тепловыделения – 20 Вт/м. Граничные условия по ребрам модели принимались следующими: конвекция $F_n = \alpha(T - T_0)$ по боковым ребрам и по верхнему ребру равнялась нулю ($\alpha = 0$ и $T_0 = 0$), а по нижнему ребру $\alpha = 50$ Вт/К·м² и $T_0 = 293$ К.

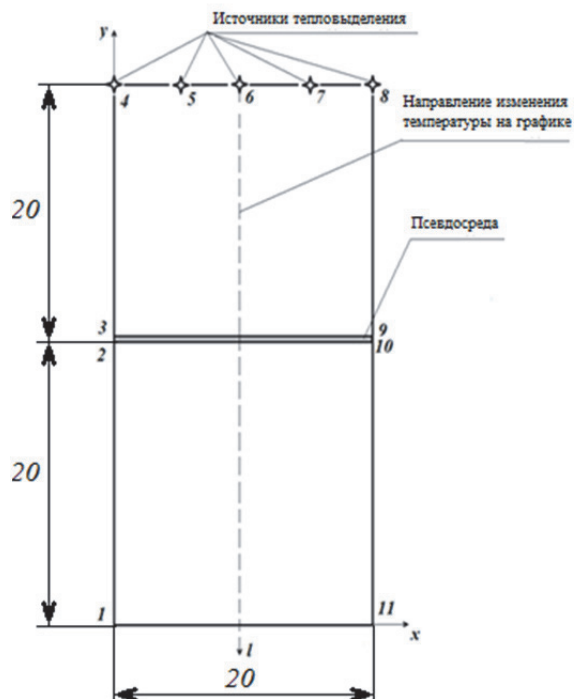


Рис. 1. Модель контактирования двух пластин

Численные эксперименты с разработанной конечноэлементной моделью проводилось с использованием пакета ELCUT [11...15].

Дискретный характер взаимодействия поверхностей в зоне контакта позволяет выделить номинальную A_a , контурную A_c и фактическую A_r площади контакта.

Для определения фактической площади в работе [16] получена зависимость

$$A_r = k A_a q_a = k P, \quad (1)$$

где q_a – номинальное давление; P – действующая нагрузка.

В зависимости от точности расчетов для коэффициента k можно принимать

$$k = 0,48075/\sigma_T \approx 0,48/\sigma_T \approx 1/(2\sigma_T), \quad (2)$$

где σ_T – предел текучести.

Толщина псевдосреды в случае упругого контакта поверхностей с одинаковыми физико-механическими свойствами и шероховатостью определяется зависимостью [16]:

$$h = 2R_p \left\{ 1 - (1/2) [q_a/\sigma_T]^{1-q_a/\sigma_T} - 0,18 [q_a/\sigma_T]^{2[1-q_a/\sigma_T]} \right\}. \quad (3)$$

Для методов обработки поверхностей со снятием стружки толщина псевдослоя может быть определена как [16, 17]

$$h \approx 2R_p = 5,2R_a = R_z, \quad (4)$$

где R_p - высота сглаживания (расстояние от линии выступов до средней линии);

R_a и R_z - параметры шероховатости.

Проведенные численные однофакторные эксперименты показали, что с уменьшением толщины псевдосреды и увеличением ее коэффициента теплопроводности перепад температуры в контакте ΔT уменьшается, соответственно уменьшается и контактное термическое сопротивление. Однако, как показал анализ применяемых материалов для изготовления шпиндельных узлов (табл. 1), коэффициенты теплопроводности варьируются незначительно, и могут быть исключены из числа параметров регрессионной модели. Поэтому в дальнейшем при проведении полного факторного эксперимента (ПФЭ) коэффициент теплопроводности принимался равным 50 Вт/(м·К).

Установлено, что с уменьшением отклонения от плоскостности, когда протяженность зоны фактического контакта (ЗФК) увеличивается, пе-

репад температуры в контакте ΔT уменьшается. Сравнение результатов влияния на КТС макроотклонений, когда создается сосредоточенная ЗФК, и волнистости, когда имеет место распределенная ЗФК той же суммарной площади, показало более существенную роль макроотклонений. Причем значение ΔT зависит от положения ЗФК в соединении (рис. 2), существенно возрастая от варианта а) (при осесимметричном расположении зоны ЗФК) до варианта в) (смещения ЗФК к границе соединения) (табл. 2).

Таким образом, на основании проведенных однофакторных экспериментов были отобраны четыре существенных фактора, формирующих характеристики псевдосреды:

- значение толщины псевдосреды, определяемое параметром шероховатости R_a (выражение (4));
- номинальное давление в контакте q_a , определяющее площадь ЗФК;
- предел текучести контактирующего материала σ_T , который также будет влиять на площадь ЗФК;
- параметр l (рис. 2), определяющий расположение ЗФК.

Таблица 1. Коэффициенты теплопроводности и пределы текучести материалов деталей шпиндельных узлов

Материал	Коэффициент теплопроводности, Вт/(м·К)	Предел текучести σ_T , МПа
Сталь 30	50,2	300
Сталь 40	51	340
Сталь 50	48	380
Сталь 40X	41	330 (нормализация) 650 (улучшение)
Сталь ШХ 15	40	370...400
Чугун СЧ20	54	150
Чугун СЧ25	50	187
Чугун СЧ35	46	297

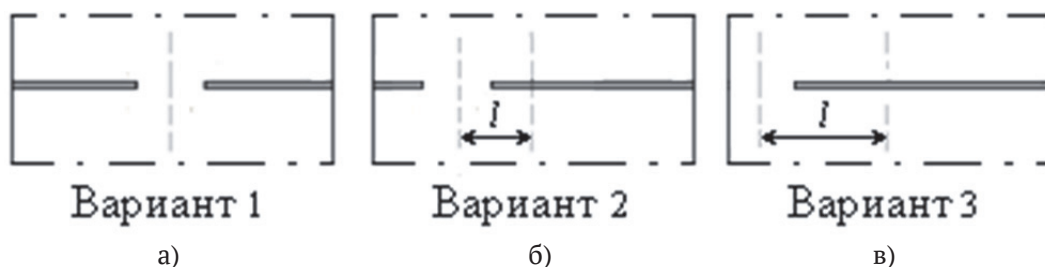


Рис. 2. Расположение ЗФК в соединении при осесимметричном (а) и неосесимметричном (б и в) расположении

Таблица 2. Зависимость перепада температуры в контакте от расположения ЗФК

Вариант расположения ЗФК	Вариант 1	Вариант 2	Вариант 3
$\Delta T, ^\circ\text{K}$	2,35	2,80	4,75

Для проведения полного факторного численного эксперимента были определены уровни варьирования выбранных факторов.

Варьирование толщины псевдосреды можно определить, воспользовавшись данными работ [18] и пункта 2.1 «Посадочные поверхности под подшипники» ГОСТ 3325-85 для подшипников с наружным диаметром до 250 мм и классами точности 2,4,5,6. При этом учитывались как расточки в корпусах, так и опорные торцы заплечиков валов и корпусов. С учетом указанных условий $h = (1...7) \cdot 10^{-6}$ м.

Возможные изменения номинального давления будут определяться предельными усилиями, прикладываемыми к соединениям деталей ШУ, и площадями опорных поясков крышек, торцов наружных колец подшипников или проставочных (дистанционных) втулок. Ограничиваясь наружными диаметрами подшипников 40...220 мм, и используя рекомендации РД 37.001.131-89 по размерам и количеству крепежных элементов и крутящим моментам, прикладываемым к ним, найдем, что усилия и давления на стыке крышки с наружным кольцом подшипника будут соответствовать, указанным в табл. 3.

Таким образом, диапазон давлений, используемый для численного моделирования, составляет $q_a = (1...175) \cdot 10^6$ Н/м².

На основании табл. 1 принимаем диапазон изменения предела текучести $\sigma_T = (150...400) \cdot 10^6$ Н/м².

С учетом размеров модели (рис. 3), параметр l с учетом возможных размеров ЗФК может меняться в диапазоне от 0 до 0,00415 м.

Таким образом, уровни и интервалы варьирования натуральных значений факторов приведены в табл. 4.

ПОСТРОЕНИЕ МАТЕМАТИЧЕСКОЙ МОДЕЛИ

В качестве выходного параметра эксперимента рассматривалось значение $\Delta T, ^\circ\text{K}$. Поскольку погрешность могла быть внесена на этапе определения ΔT по графикам изменения температуры при прохождении тепловым потоком псевдосреды, то результаты численного моделирования обрабатывались 3-хратно.

Уравнение регрессии для 4-х выбранных факторов находилось с учетом их взаимодействия в виде

Таблица 3. Исходные данные для определения максимального давления в соединениях деталей шпиндельного узла

Наружный диаметр подшипника, мм	40...65	65...100	100...150	150...220
Площадь опорного торца, мм ²	550	1112	2045	3569
Суммарное усилие от крепежных элементов, Н	92820	167308	355848	565386
Давление в стыке, Н/мм ²	168,8	150,5	174,0	158,4

Таблица 4. Уровни и интервалы варьирования натуральных значений факторов

Факторы	Нижний уровень	Верхний уровень	Основной уровень	Интервал варьирования
$h, \text{ м}$	$1 \cdot 10^{-6}$	$7 \cdot 10^{-6}$	$4 \cdot 10^{-6}$	$3 \cdot 10^{-6}$
$q_a, \text{ Н/м}^2$	$1 \cdot 10^6$	$175 \cdot 10^6$	$88 \cdot 10^6$	$87 \cdot 10^6$
$\sigma_T, \text{ Н/м}^2$	$150 \cdot 10^6$	$400 \cdot 10^6$	$275 \cdot 10^6$	$125 \cdot 10^6$
$l, \text{ м}$	0	0,00415	0,002075	0,002075

$$\begin{aligned}
 y = & b_0 + b_1x_1 + b_2x_2 + b_3x_3 + b_4x_4 + b_{12}x_1x_2 + \\
 & + b_{13}x_1x_3 + b_{14}x_1x_4 + b_{23}x_2x_3 + b_{24}x_2x_4 + \\
 & + b_{34}x_3x_4 + b_{123}x_1x_2x_3 + b_{124}x_1x_2x_4 + \\
 & + b_{134}x_1x_3x_4 + b_{234}x_2x_3x_4 + b_{1234}x_1x_2x_3x_4.
 \end{aligned}
 \tag{5}$$

Матрица планирования ПФЭ типа 2⁴ показана в табл. 5. Результаты обработки данных численного моделирования приведены в табл. 6.

Проверка воспроизводимости опытов (однородности дисперсий) проводилась по критерию Кохрена.

Расчетное значение этого критерия определялось по формуле:

$$G_p = \frac{\max \sigma_j^2}{\sum_{j=1}^N \sigma_j^2}, \tag{6}$$

где σ_j^2 – выборочная дисперсия выходной величины y по j строке матрицы планирования, полученная из m параллельных опытов:

$$\sigma_j^2 = \frac{1}{m-1} \sum_{i=1}^m (y_{ij} - \bar{y}_j)^2, \tag{7}$$

где y_{ij} – значение выходной величины по j строке матрицы планирования (j изменяется от 1 до N) из i -го параллельного опыта (i изменяется от 1 до m);

\bar{y}_j – среднее значение выходной переменной, полученное из параллельных опытов по j строке матрицы планирования (табл. 6);

$\max \sigma_j^2$ – наибольшая из дисперсий в строках плана.

При $\max \sigma_j^2 = 0,0009335$ и $\sum_{j=1}^N \sigma_j^2 = 0,003736$

получаем $G_p = 0,2499$. При уровне значимости 0,95 критическое значение критерия Кохрена равно $G_{kp} = 0,319$.

Так как условие $G_p < G_{kp}$ выполняется, то гипотеза о воспроизводимости опытов (однородности дисперсий) принимается.

Коэффициенты уравнения регрессии (5) находились по формуле

$$b_i = \frac{1}{N} \sum_{j=1}^N x_{ij} \bar{y}_j; \tag{8}$$

Таблица 5. Матрица планирования ПФЭ типа 2⁴

№ опыта	Факторы				Взаимодействия											
	x_1	x_2	x_3	x_4	x_1x_2	x_1x_3	x_1x_4	x_2x_3	x_2x_4	x_3x_4	$x_1x_2x_3$	$x_1x_2x_4$	$x_1x_3x_4$	$x_2x_3x_4$	$x_1x_2x_3x_4$	
1	-	-	-	-	+	+	+	+	+	+	-	-	-	-	+	
2	+	-	-	-	-	-	-	+	+	+	+	+	+	-	-	
3	-	+	-	-	-	+	+	-	-	+	+	+	-	+	-	
4	+	+	-	-	+	-	-	-	-	+	-	-	+	+	+	
5	-	-	+	-	+	-	+	-	+	-	+	-	+	+	-	
6	+	-	+	-	-	+	-	-	+	-	-	+	-	+	+	
7	-	+	+	-	-	-	+	+	-	-	-	+	+	-	+	
8	+	+	+	-	+	+	-	+	-	-	+	-	-	-	-	
9	-	-	-	+	+	+	-	+	-	-	-	+	+	+	-	
10	+	-	-	+	-	-	+	+	-	-	+	-	-	+	+	
11	-	+	-	+	-	+	-	-	+	-	+	-	+	-	+	
12	+	+	-	+	+	-	+	-	+	-	-	+	-	-	-	
13	-	-	+	+	+	-	-	-	-	+	+	+	-	-	+	
14	+	-	+	+	-	+	+	-	-	+	-	-	+	-	-	
15	-	+	+	+	-	-	-	+	+	+	-	-	-	+	-	
16	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	

Таблица 6. Результаты обработки данных численного моделирования

№ опыта	Параллельные опыты			\bar{y}_j	σ_j^2	\hat{y}_j	$(\bar{y}_j - \hat{y}_j)^2$
	y_1	y_2	y_3				
1	0,18	0,16	0,15	0,163	0,0002335	0,158	0,000025
2	0,89	0,89	0,87	0,883	0,0002425	0,880	0,000009
3	0,025	0,02	0,04	0,028	0,0001085	0,034	0,000036
4	0,09	0,13	0,15	0,123	0,0009335	0,128	0,000025
5	0,17	0,18	0,16	0,170	0,0001	0,176	0,000036
6	0,92	0,92	0,96	0,933	0,0005335	0,930	0,000009
7	0,11	0,14	0,12	0,123	0,0002335	0,120	0,000009
8	0,49	0,46	0,44	0,463	0,0006335	0,462	0,000001
9	0,17	0,18	0,18	0,177	0,0000335	0,182	0,000025
10	0,98	0,97	0,97	0,973	0,0000335	0,976	0,000009
11	0,06	0,06	0,06	0,060	0	0,058	0,000004
12	0,23	0,25	0,21	0,230	0,0004	0,224	0,000036
13	0,175	0,19	0,19	0,185	0,000075	0,180	0,000025
14	1,0	1,01	1,0	1,003	0,0000335	1,006	0,000009
15	0,11	0,13	0,125	0,122	0,0001085	0,124	0,000004
16	0,54	0,53	0,54	0,537	0,0000335	0,538	0,000001

$$\begin{aligned}
 b_0 &= 0,386; & b_{12} &= -0,13; & b_{123} &= 0,027; \\
 b_1 &= 0,257; & b_{13} &= 0,035; & b_{124} &= 1,188 \cdot 10^{-3}; \\
 b_2 &= -0,175; & b_{14} &= 0,018; & b_{134} &= -1,313 \cdot 10^{-3}; \\
 b_3 &= 0,056; & b_{23} &= 0,044; & b_{234} &= -2,937 \cdot 10^{-3}; \\
 b_4 &= 0,025; & b_{24} &= 1,438 \cdot 10^{-3}; & b_{1234} &= 1,313 \cdot 10^{-3}; \\
 & & b_{34} &= -5,312 \cdot 10^{-3}.
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 t_{p0} &= 175,45; & t_{p12} &= 59,09; & t_{p123} &= 12,27; \\
 t_{p1} &= 116,82; & t_{p13} &= 15,91; & t_{p124} &= 0,54; \\
 t_{p2} &= 79,55; & t_{p14} &= 8,182; & t_{p134} &= 0,551; \\
 t_{p3} &= 25,45; & t_{p23} &= 20,0; & t_{p234} &= 1,335; \\
 t_{p4} &= 11,36; & t_{p24} &= 0,654; & t_{p1234} &= 0,597. \\
 t_{p34} &= 2,415;
 \end{aligned}$$

Значимость коэффициентов уравнения регрессии оценивалась по критерию Стьюдента

$$t_p = \frac{|b_i|}{\sqrt{\sigma_g^2}}, \quad (9)$$

где $\sigma_g^2 = \frac{\sigma_y^2}{N \cdot m}$ – дисперсия коэффициентов;

$$\sigma_y^2 = \frac{\sum_{j=1}^N \sigma_j^2}{N} \text{ – дисперсия воспроизводимости.}$$

Для рассматриваемого случая $\sigma_y^2 = 0,0002335$; $\sigma_g^2 = 0,0000048645$;

При степени свободы дисперсии воспроизводимости $f = N(m-1) = 16(3-1) = 32$ и уровне значимости 0,95 критическое значение критерия Стьюдента равно $t_{кр} = 2,038$.

Таким образом, для коэффициентов b_{24} ; b_{124} ; b_{134} ; b_{234} и b_{1234} условие $t_p > t_{кр}$ не выполняется. Эти коэффициенты являются незначимыми, приравниваются нулю и могут быть исключены из уравнения регрессии вместе с соответствующим фактором.

Таким образом, уравнение регрессии после исключения незначимых коэффициентов и факторов записывается в виде

$$\begin{aligned} \hat{y} = & b_0 + b_1x_1 + b_2x_2 + b_3x_3 + \\ & + b_4x_4 + b_{12}x_1x_2 + b_{13}x_1x_3 + \\ & + b_{14}x_1x_4 + b_{23}x_2x_3 + \\ & + b_{34}x_3x_4 + b_{123}x_1x_2x_3. \end{aligned} \quad (10)$$

Адекватность полученной математической модели экспериментальным результатам проверялась с использованием критерия Фишера путем сравнения его расчетного значения F_p с критическим $F_{кр}$.

Модель адекватна, если выполняется неравенство:

$$F_p = \frac{\sigma_{ад}^2}{\sigma_y^2} \leq F_{кр}, \quad (11)$$

где $\sigma_{ад}^2$ – дисперсия адекватности (остаточная дисперсия):

$$\sigma_{ад}^2 = \frac{m}{N-d} \sum_{j=1}^N (\bar{y}_j - \hat{y}_j)^2, \quad (12)$$

где d – число значимых коэффициентов уравнения регрессии, включая и b_0 ;

\hat{y}_j – рассчитанное по модели значение отклика в j опыте.

По формулам (12) и (11) получаем $\sigma_{ад}^2 = 0,0001578$ и $F_p = 0,6758$.

Поскольку критическое значение критерия Фишера $F_{кр} = 2,68$ и условие (11) выполняется, то полученное уравнение (10) является адекватным экспериментальным результатам.

Для записи математической модели в реальных физических величинах использовалась зависимость кодированной величины от реальной:

$$\begin{aligned} x_1 = \frac{h - 4 \cdot 10^{-6}}{3 \cdot 10^{-6}}; x_2 = \frac{q_a - 88 \cdot 10^6}{87 \cdot 10^6}; \\ x_3 = \frac{\sigma_T - 275 \cdot 10^6}{125 \cdot 10^6}; x_4 = \frac{l - 0,002075}{0,002075}. \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \Delta T = & 0,055 + 7,403 \cdot 10^4 h - 2,216 \cdot 10^{-10} q_a + \\ & + 5,25 \cdot 10^{-11} \sigma_T + 6,1121 - 7,257 \cdot 10^{-4} h q_a + \\ & + 2,05 \cdot 10^{-5} h \sigma_T + 2,892 \cdot 10^6 h l + 0,736 \cdot 10^{-18} q_a \sigma_T - \\ & - 2,048 \cdot 10^{-8} \sigma_T l + 8,276 \cdot 10^{-13} h \sigma_T q_a \end{aligned} \quad (13)$$

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В связи со значительным числом факторов, влияющих на формирование контактного термического сопротивления, и различием весо-мности их действия предложено для их всесто-

ронного учета в тепловой модели соединения деталей использовать псевдослой (псевдосреду), состоящий из площадок фактического контакта и полостей, заполненных воздухом или маслом.

Для определения значимых факторов, оказывающих доминирующее влияние на контактное термическое сопротивление, был проведен ряд однофакторных экспериментов, в результате которых были выделены следующие факторы: значение толщины псевдосреды, номинальное давление в контакте; предел текучести контактирующего материала; параметр, определяющий расположение зоны фактического контакта. Для разработки регрессионной модели изменения температуры в зоне контакта был выполнен ПФЭ типа 2⁴. Полученные результаты были проверены по критериям Кохрена, Стьюдента и Фишера.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Денисенко А.Ф., Подкруглык Л.Ю. Разработка тепловой модели шпиндельной опоры металлорежущего станка/ Известия Самарского научного центра Российской академии наук. 2020. Т. 22. № 3. С.49-55.
2. A F Denisenko and L Y Podkruglyak. Heat model of a spindle support of a precision metal cutting machine/ IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering 971 (2020) 022020. doi:10.1088/1757-899X/971/2/022020.
3. Меснянкин С.Ю., Викулов А.Г., Викулов Д.Г. Современный взгляд на проблемы теплового контактирования твердых тел/ Успехи физических наук. 2009. Т. 179, № 9. С. 945–970.
4. Katenev S (2018) Method for automated building of spindle thermal model with use of CAE system. IOP Conf. Ser.: Mater. Sci. Eng. 327 022055.
5. Липов А.В., Большаков Г. С., Панчурич В. В. Модель тепловых деформаций шпиндельного узла сверлильного станка/ Модели, системы, сети в экономике, технике, природе и обществе, 2014, 4 (12), С. 124–128.
6. Prabhu V Raja, Sathiya R Moorthy (2019) Thermal modelling of a high speed motor spindle. Arabian Journal for Science and Engineering. <https://doi.org/10.1007/s13369-019-03732-x>.
7. Yang Li et al (2015) A review on spindle thermal error compensation in machine tools. International Journal of Machine Tools & Manufacture 95: 20–38.
8. Li Wu, Qingchang Tan Study of a Spindle-Bearing System Entropy 18, 271:1-25.
9. Измайлов В.В., Чаплыгин С.А. Электротепловая аналогия и расчет проводимости дискретного контакта деталей машин // Интернет-журнал «НАУКОВЕДЕНИЕ» Том 8, №2 (2016). <http://naukovedenie.ru/PDF/26TVN216.pdf> (доступ свободный). DOI: 10.15862/26TVN216.
10. Денисенко А.Ф. Назаров Н.С. Формирование регрессионной модели контактного термического сопротивления плоских соединений шпиндельных узлов/ Сборка в машиностроении, приборостроении, 2017. №7. С.325-329.

11. Салова И.А., Хрущев В.В. Моделирование в ELCUT. - Санкт-Петербург: Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения, 2007. - 54 с.
12. ELCUT. Моделирование электромагнитных, тепловых и упругих полей методом конечных элементов. Версия 6.0. Руководство пользователя. – СПб: ООО «Тор», 2013.
13. Семернин А.Н., Урванов А.А. Применение программы «ELCUT» для моделирования магнитных полей в электрических машинах/ Энергетические системы. 2016. № 1. С. 289-291.
14. Татевосян А.С., Татевосян А.А., Захарова Н.В., Шелковников С.В. Решение задачи оптимального управления электромагнитным приводом колебательного движения на основе применения программы «ELCUT»/ Международный журнал прикладных и фундаментальных исследований. 2015. № 11-1. С. 19-24.
15. Андреева Е.Г., Татевосян А.А., Семина И.А. Исследование магнитного поля системы открытого типа с использованием комплекса программ ELCUT/ Динамика систем, механизмов и машин. 2009. № 1. С. 111-114.
16. Хохлов В.М., Хохлова С.В., Петраков Д.И. Расчет соединений. - Брянск, ООО «ВИМАХО», 2007. - 208 с.
17. Рыжов Э.В., Хохлов В.М. Расчет шероховатости поверхности в условиях избирательного переноса // Применение избирательного переноса в узлах трения машин. - М., 1976. - С. 35-40.
18. Фигатнер А.М. Шпиндельные узлы современных металлорежущих станков. М.: НИИМаш, 1983.- 60 с.

CONSTRUCTION OF A REGRESSION MODEL OF THERMAL RESISTANCE OF A CONTACT PSEUDO MEDIUM

© 2021 A.F. Denisenko, L.Yu. Podkruglyak

Samara State Technical University

The operating experience of metal-cutting machines made it possible to develop reasonable recommendations for the permissible limit values of temperature for the main subsystems of the machine, which determine the accuracy of processing. However, the decrease in the seriality of the manufactured metal-cutting equipment and the constant improvement of its designs require the development of models that are the basis of engineering techniques that allow at the design stage to predict the thermal picture of the main machine units that affect the processing accuracy. In connection with a significant number of factors influencing the formation of contact thermal resistance, and the difference in the weight of their action, it is proposed to use a pseudolayer (pseudo-medium), consisting of areas of actual contact and cavities filled with air or oil, for their comprehensive consideration in the thermal model of joining parts. To determine the significant factors that dominate the contact thermal resistance, a number of one-factor experiments were carried out. To develop a regression model of temperature change in the contact zone, a PFE of type 24 was performed. The results obtained were verified by the Cochran, Student and Fisher criteria.

Key words: contact thermal resistance, nominal contact area, actual contact area, pseudo-medium, finite element model, full factorial experiment, regression model.

DOI: 10.37313 / 1990-5378-2021-23-3-47-54