**Энгельсский технологический институт (филиал)
федерального государственного бюджетного образовательного
учреждения высшего образования
«Саратовский государственный технический университет
имени Гагарина Ю. А.»**

Кафедра ОТМ

Методические указания для выполнения лабораторных работ по дисциплине

«Процессы и операции формообразования»
«Физические основы обработки материалов»

для студентов направлений

15.03.05 «Конструкторско-технологическое обеспечение машиностроительных производств»
Профиль – «Технология машиностроения» и

очной и заочной форм обучения

Электронное издание локального распространения

Энгельс 2025г.

УДК 006(075.8)
ББК 30.10я73
М31

М31 Автор-составитель: Стекольников М.В..: Методические указания для выполнения лабораторных работ по дисциплине «Процессы и операции формообразования» – Энгельс: Изд-во ЭТИ (филиал) СГТУ имени Гагарина Ю.А., 2023. – с.

Рекомендуется студентам (15.03.05) «Конструкторско-технологическое обеспечение машиностроительных производств», профиль – «Технология машиностроения»
очной и заочной форм обучения

.

УДК 006(075.8)
ББК 30.10я73

Электронное издание локального распространения

Одобрено редакционно-издательским советом
ЭТИ (филиал) СГТУ имени Гагарина Ю.А.

Указания издаются в авторской редакции

Лабораторная работа № 1

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ДЕФОРМАЦИИ СРЕЗАЕМОГО СЛОЯ

Основные понятия

Процесс превращения срезаемого слоя в стружку является предметом внимания большого числа исследователей и производственников, поскольку он показывает существо самого процесса резания, его физику и теорию. Для познания процесса стружкообразования можно пользоваться различными методами:

1. Визуальное наблюдение отполированной боковой поверхности обрабатываемого образца.
2. Наблюдение сетки, нанесенной на боковую отполированную поверхность, и измерения ее искажения в результате пластической деформации срезаемого слоя (метод координатной сетки).
3. Киносъемка процесса резания и сопровождающих его явлений.
4. Изучение микрошлифов зоны резания.
5. Поляризационно-оптическое изучение напряжений в зоне резания.
6. Измерение твердости и расчета напряжений в зоне резания.
7. Микроскопическое (электронно-микроскопическое) исследование стружки в зоне резания.
8. Рентгеноструктурный анализ.

Многочисленными экспериментальными исследованиями доказано, что в зависимое от обрабатываемого материала и других условий резания процесс образования стружки протекает различно, вследствие чего и вид стружки изменяется. Перемещаясь, резец оказывает давление на слой металла толщиной *a* и создаёт впереди в металле сложное упругое напряжённое состояние, переходящее затем по мере движения в пластическую деформацию. Последняя просматривается отчетливо в плоскости ОТ (рис. 1), расположенной под некоторым углом Ф. Эту плоскость называют плоскостью сдвига и соответственно угол Ф - угол сдвига. Вдоль этой плоскости происходит сдвиг элемента стружки. По мере дальнейшего движения резца образуются все новые элементы, и срезаемый деформированный слой металла в виде стружки

толщиной *a*, и шириной b_1 отходит, перемещаясь в направлении, нормальном плоскости сдвига.

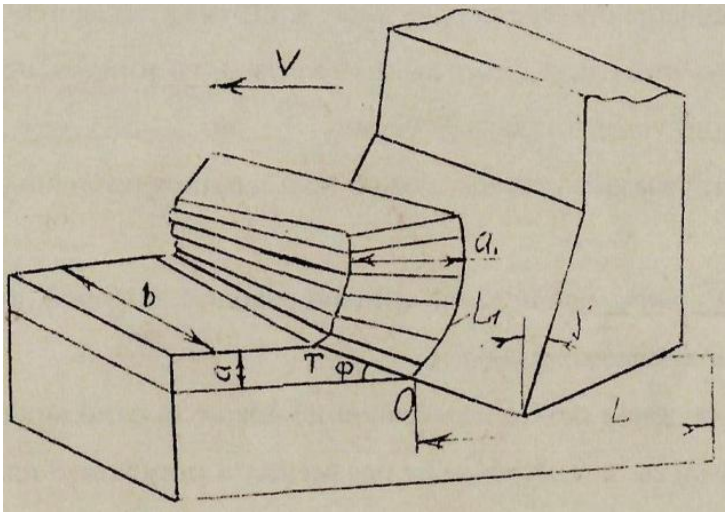


Рис. 1. Элементы резания при строгании.

На рис. 1 толщина стружки a_1, больше толщины среза a ($a_1>a$), ширина стружки b_1 больше ширины среза b ($b_1>$ b), а длина стружки L_1 меньше длины L ($L_1<L$).

Усадка стружки. Одной из характеристик процесса резания является усадка стружки. Усадкой *k* называется отношение толщины стружки a_1, к толщине среза *a* (поперечная усадка), или отношение длины пути L, пройденного резцом, к длине снятой стружки L_1 (продольная усадка). Величина *k* является одной из основных характеристик процесса резания. Ее величина различна для различных металлов. При обработке хрупких металлов, когда образуется стружка надлома, усадка ее весьма мала или отсутствует. На ее величину влияют толщина среза *a*, передний угол γ и скорость резания v:

$$k = \frac{\cos(\gamma - \Phi)}{\sin \Phi} \qquad (1)$$

Относительный сдвиг. Усадка стружки в определенной степени характеризует степень пластической деформации стружки, но не всегда. Отсутствие усадки, когда *k* = 1, не означает отсутствие пластической деформации. Она в действительности может иметь место и выражаться действительным сдвигом элемента стружки. На рис. 2 показана пластическая зона резания OTO_1 и деформированный элемент стружки толщиной O_1M.

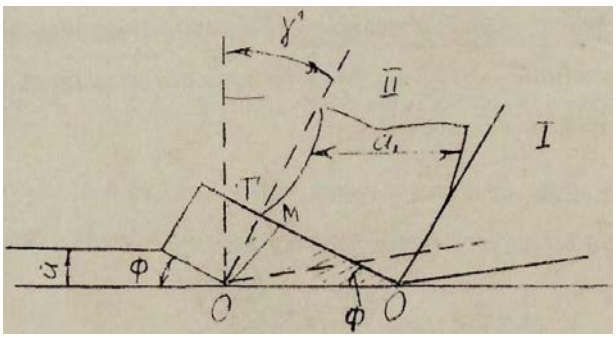


Рис. 2. Элементы срезаемого слоя.

Мерой интенсивности деформации считается относительный сдвиг - отношение величины деформации к толщине слоя, к толщине слоя претерпевающего эту деформацию, то есть:

$$q = \frac{OT}{O_1M}$$

или

$$q = ctg\Phi + tg(\Phi - \gamma) \qquad (2)$$

Содержание работы

1. Экспериментальное определение зависимости коэффициента усадки стружки *k* и относительного сдвига q от размеров среза *a, b, L* и скорости резания v.
2. Построение графиков зависимости коэффициента усадки стружки *k* относительно сдвига q от исследуемых параметров.
3. Выводы.

Исследование деформации при свободном резании. Качественная и количественная оценка величины и характера деформации в различных точках зоны свободного резания наиболее просто может быть сделана в результате наблюдения боковой поверхности обрабатываемого образца, покрытой координатой сеткой. Сетка, нанесенная на боковую поверхность образца (рис. 3), при резании искажается, что дает возможность наблюдать процесс деформации во всех точках зоны в его развитии и протекании. Для проведения эксперимента резец 1 закрепляется в резцедержателе строгального станка. Образец 2 в виде пластины с нанесенной сечкой на боковой плоскости устанавливается и зажимается в тисках на столе станка.

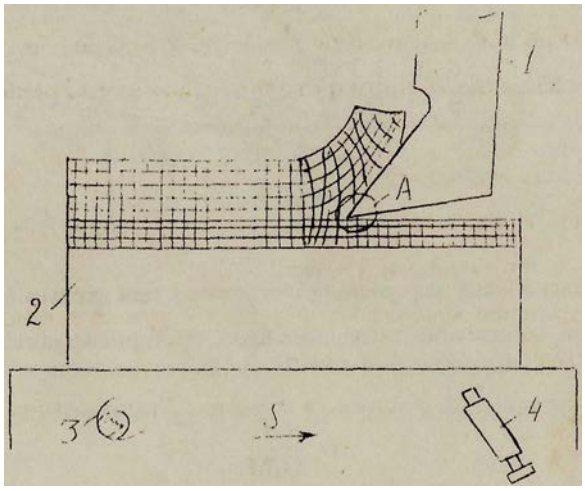


Рис. 3. Исследование деформации при свободном резании.

Освещение зоны резания А производится лампой 3. Луч света, отраженный от боковой стороны пластинки-образца, проходит через оптическую трубу 4, дающую увеличение в 20-30 раз, и попадает в поле зрения наблюдателя. В качестве оптической трубки используется тубус лупы Бринеля.

При исследовании процесса стружкообразования этим методом пластинки образца рекомендуется изготавливать из стали, меди, бронзы, чугуна.

Перед нанесением координатной сетки на боковую поверхность пластинки образца ее тщательно полируют. Сетка может быть нанесена топографическими методами или царапанием. При наличии специального инструмента метод царапания оказывается прочнее топографического. В качестве инструмента для царапания боковой поверхности пластинки могут служить круглые или призматические гребенки для нарезания резьбы с шагом 0,5мм. Такого рода инструмент позволяет за два прохода проводить сразу несколько параллельных рисок, пересекающихся под углом 90°. Эти риски для большей четкости можно затем заполнять черной краской.

Экспериментальное определение зависимости коэффициента усадки стружки *к* и относительного сдвига q от элементов режима резания

Проводится две серии опытов:

1. Определение коэффициента усадки стружки и относительного сдвига при v = const и S ≠ const.

2. Определение коэффициента усадки стружки и относительного сдвига при v ≠ const и S = const.

Результаты экспериментов заносятся в протокол исследования.

Протокол исследования

№ Опыта	Углы резца			Размеры среза				Скорость ре-зания	Вес стружки	Коэф. прод. усадки	Относит. сдвиг	Тип стружки
	Передн.	Задний	Наклона реж. кр.	Толщина среза	Ширина среза	Длина резания	Длина стружки					
	γ	α	λ	a	b	L	L_1	v	G	k	q	

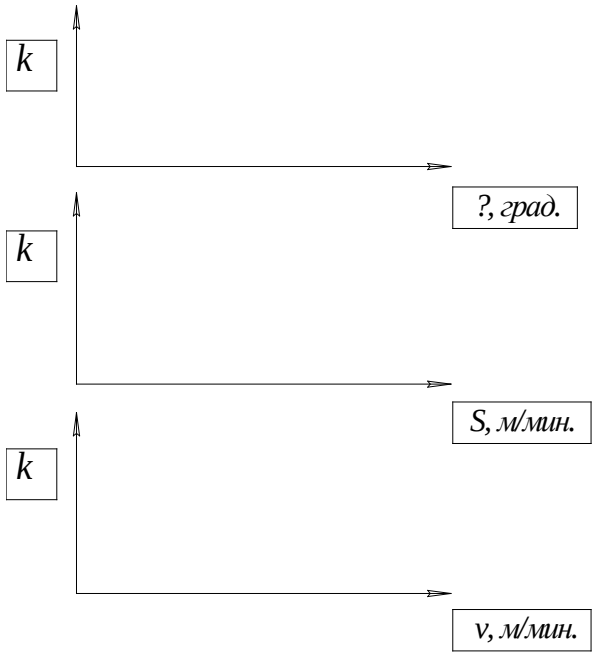


Рис. 4. Зависимость коэффициента усадки от δ, *S* и *v*.

Определив значения *k* для всех произведенных опытов, необходимо построить графики зависимости коэффициентов усадки от угла резания $k=f(\delta)$ (где $\delta = 90° - \gamma$), подачи $k = f(S)$, $k = f(v)$ (рис.4). Сделать выводы о характере полученных закономерностей.

Некоторые значения коэффициента усадки стружки могут быть проверены с использованием второго способа определения, который предполагает знание площади поперечного сечения стружки. Площадь поперечного сечения стружки F_1 можно определить путем взвешивания.

Методика работы при этом заключается в следующем: от исследуемой стружки отделяется элемент произвольной длины Δ и взвешивается на аналитических весах; пусть вес этого кусочка будет G.

Вес стружки связан с величиной Δ и может быть выражен формулой:

$$G = \frac{F_1 \Delta \rho}{1000}$$

где Δ – длина кусочка стружки, мм;

ρ – плотность материала заготовки;

$$F_1 = \frac{1000G}{\Delta \rho}.$$

Тогда коэффициент усадки стружки может быть определен по формуле:

$$k = \frac{F_1}{F} = \frac{1000G}{\Delta \rho ts}.$$

Контрольные вопросы

1. При обработке каких материалов наблюдается “отрицательная” усадка стружки? Объясните механизм этого явления.
2. Какие параметры в процессе резания оказывают существенное влияние на усадку стружки?
3. Можно ли считать, что отсутствие усадки стружки означает отсутствие пластической деформации?
4. В чем выражается связь между величиной усадки стружки и относительным сдвигом?
5. Как рассчитать значение усадки стружки, при которой обеспечивается минимальное значение относительного сдвига?

Содержание и оформление отчета

Отчет по лабораторной работе должен включать:

1. Название лабораторной работы;
2. Цель работы;
3. Протоколы опытов;
4. Графики зависимостей;
5. Расчетные формулы;
6. Заключение.

Лабораторная работа № 2

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ СИЛ РЕЗАНИЯ

Величину сил резания и их зависимость от различных факторов необходимо знать для расчета мощности станка, прочности инструмента, приспособления и механизмов, точности обработки.

Кроме того, измерение сил резания позволяет решать вопросы, связанные с исследованием тепловых явлений, износом инструмента, назначением оптимальных режимов резания.. Многочисленными экспериментальными исследованиями установлено, что зависимость усилия резания P от элементов режима резаная удовлетворительно описывается уравнением типа

$$P = C_P \cdot t^{X_P} \cdot S^{Y_P} \cdot V^{Z_P} \quad (1)$$

где C_P – постоянный коэффициент, зависящий от свойств обрабатываемого материала, геометрии и материала режущей части инструмента, наличия и вида охлаждения, диаметра обработки и других факторов;

x_p, y_p, z_p – показатели, определяющие степень влияния на усилие резания P элементов режима резания: глубины t, подачи S и V.

Цель работы – исследовать зависимость усилий резания при точении от элементов режима резания - глубины t, подачи S и скорости V.

Содержание работы:

1. Экспериментальное определение зависимости сил резания от глубины резания t, подачи S и скорости V.
2. Построение графиков зависимости усилий резания от исследуемых параметров.
3. Вывод обобщенных уравнений исследуемых зависимостей типа (1).

В процессе резания измеряются составляющие P_X, P_Y, и P_Z общего усилия резания R. Схема расположения этих составляющих, действующих на резец при точении, показана на рис.4.

Измерение сил резания осуществляется динамометрами. Схема используемого в работе трехкомпонентного токарного динамометра показана на рис. 5.

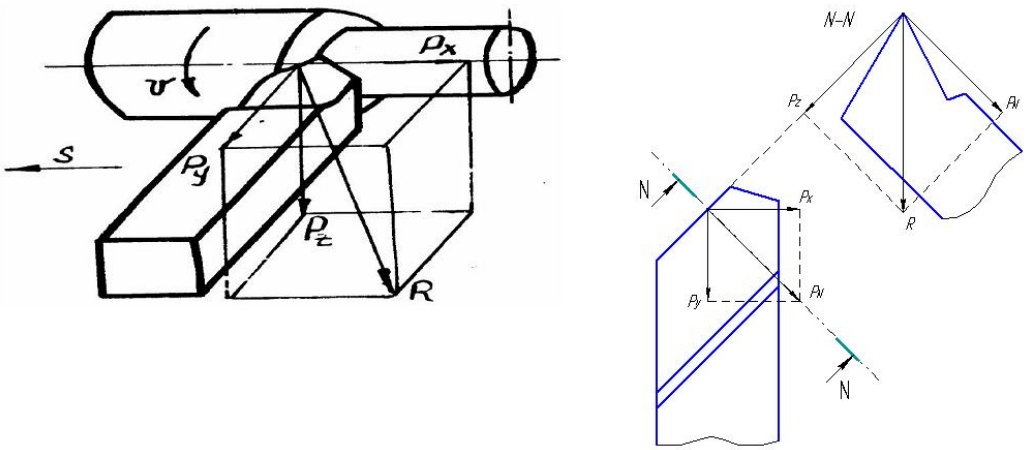


Рис. 1. Разложение усилия резания на составляющие

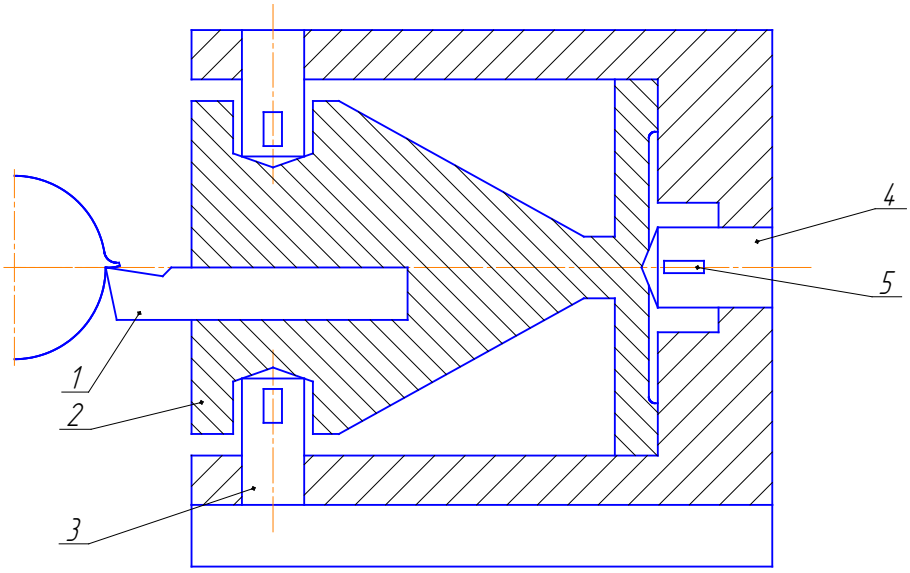


Рис. 2. Принципиальная схема трехкомпонентного тензометрического динамометра

Резец 1 крепится в люльке 2 динамометра. В передней части люлька 2 поджата, с четырех сторон упругими пустотелыми стержнями 3. С задней стороны вдоль оси люлька поджимается упругим стержнем 4. На поверхности стержней 3 и 4 наклеены тензометрические датчики сопротивления 5, которые служат для измерения деформаций стержней, возникающих под действием составляющих P_X, P_Y, и P_Z. Сигналы от датчиков поступают на вход тензометрического усилителя, а оттуда на регистрирующие приборы. Чтобы выразить силы резания в килограммах, необходимо воспользоваться тарировочным графиком, отражающим зависимость между показаниями прибора

(милливольтметра, осциллографа и соответствующими им нагрузками в килограммах).

Экспериментальное определение сил резания

Определение зависимости сил резания от элементов режима обработки производится при точении на токарно-винторезном станке 16К20 стальной заготовки диаметром 50-100мм. проходным резцом, оснащенным пластиной твердого сплава. Геометрические параметры инструмента и режимы резания задаются преподавателем и заносятся в протокол.

Производится три серии опытов:

1. Определяются силы P_X, P_Y, и P_Z при различных значениях t и постоянных $V=V_C$ и $S=S_C$.

2. Определяются силы P_X, P_Y, и P_Z при различных значениях S и постоянных $V=V_C$ и $t=t_C$.

3. Определяются силы P_X, P_Y, и P_Z при различных значениях V и постоянных $t=t_C$ и $S=S_C$.

Результаты экспериментов заносятся в протокол исследований.

Обработка результатов

1. Графоаналитический метод

По результатам экспериментов строятся в двойной логарифмической системе координат (на логарифмической бумаге или при помощи логарифмической линейки) графики частных зависимостей:

$$P_X = C_{Px_t} \cdot t^{X_{Px}};\ P_X = C_{P_{Xs}} \cdot S^{Y_{Px}};\ P_X = C_{Px_V} \cdot V^{Z_{Px}}$$

$$P_Y = C_{Py_t} \cdot t^{X_{Py}};\ P_Y = C_{P_{ys}} \cdot S^{Y_{Py}};\ P_Y = C_{Py_v} \cdot V^{Z_{Py}}$$

$$P_Z = C_{Pz_t} \cdot t^{X_{Pz}};\ P_Z = C_{P_{Zs}} \cdot S^{Y_{Pz}};\ P_Z = C_{Pz_v} \cdot V^{Z_{Pz}}$$

где согласно уравнения (1)

$$C_{Px_t} = C_{Px} \cdot S_C^{Yp_X} \cdot V_C^{Zp_X};\ C_{Px_S} = C_{Px_S} \cdot t_C^{Xp_X} \cdot V_C^{Zp_X};\ C_{Px_V} = C_{Px} \cdot t_C^{Xp_X} \cdot S_C^{Yp_X}$$

$$C_{Py_t} = C_{Py} \cdot S_C^{Yp_Y} \cdot V_C^{Zp_Y};\ C_{Py_S} = C_{Py_S} \cdot t_C^{Xp_y} \cdot V_C^{Zp_y};\ C_{Py_V} = C_{Py} \cdot t_C^{Xp_Y} \cdot S_C^{Yp_Y}$$

$$C_{Pz_t} = C_{Pz} \cdot S_C^{Yp_Z} \cdot V_C^{Zp_Z};\ C_{Pz_S} = C_{Pz_S} \cdot t_C^{Xp_Z} \cdot V_C^{Zp_Z};\ C_{Pz_V} = C_{Pz} \cdot t_C^{Xp_Z} \cdot S_C^{Yp_Z} \quad (3)$$

Прологарифмировав уравнение (2), мы получим линейные уравнения вида

$$\lg P_X = \lg C_{Px_T} + x_{P_X} \cdot \lg t;\ \lg P_X = \lg C_{Px_S} + y_{Px} \cdot \lg S;\ \lg P_X = \lg C_{Px_V} + z_{Px} \cdot \lg V;$$

$$\lg P_Y = \lg C_{Py_T} + x_{P_Y} \cdot \lg t;\ \lg P_Y = \lg C_{Py_S} + y_{Py} \cdot \lg S;\ \lg P_Y = \lg C_{Py_V} + z_{Py} \cdot \lg V;$$

$$\lg P_Z = \lg C_{Pz_T} + x_{P_Z} \cdot \lg t;\ \ \lg P_Z = \lg C_{Pz_S} + y_{Pz} \cdot \lg S;\ \ \lg P_Z = \lg C_{Pz_V} + z_{Pz} \cdot \lg V;$$

или в общем виде

$$y = a + bx$$

Следовательно, в логарифмической системе координат зависимости (2) будут изображаться в виде прямых наклонных линий. Тангенс угла наклона этих линий к оси абсцисс есть показатель степени при соответствующем аргументе.

Например, в результате проведения четырех первых опытов серии Pz = f(t) получили при

$t_1 = 0{,}5 мм.\quad P_{Z1} = 38 кгс$

$t_2 = 1{,}0 мм.\quad P_{Z2} = 76 кгс$

$t_3 = 1{,}5 мм.\quad P_{Z3} = 103 кгс$

$t_4 = 2{,}0 мм.\quad P_{Z4} = 130 кгс$

Значения P_Z, P_{Z2}, P_{Z3} и P_{Z4} наносятся на графике в логарифмических координатах в виде точек 1,2,3,4 (рис.6), которые соединяются прямой АБ.

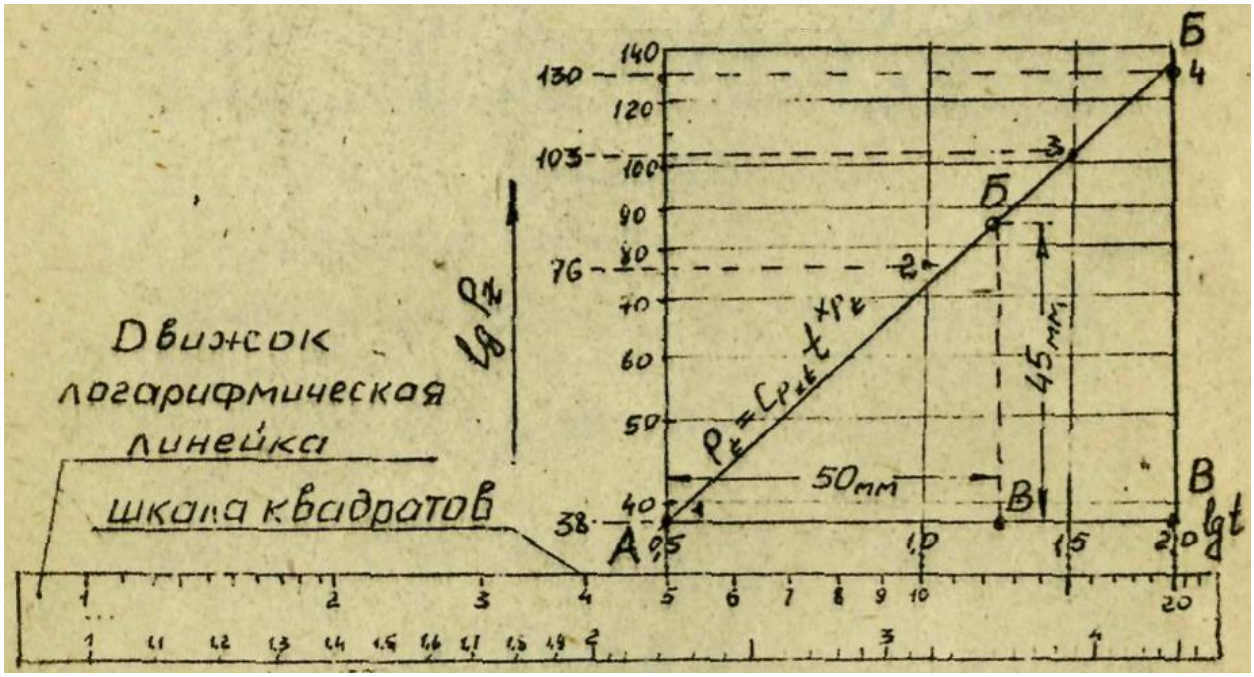


Рис.3. Пример графического изображения зависимости

Если при этом результат какого-то одного опыта резко выпадает из прямой, которая удовлетворительно проходит через остальные точки, его при проведении прямой не учитывают. При этом предпочтение отдается результатам, где значения аргумента (t, S или V) выше, т.е. в этих опытах относи-

тельная погрешность проведения эксперимента и измерений, как правило, меньше. Тангенс угла БАВ численно равен показателю Хр при глубине резания t в уравнениях (2) и (1). Наиболее удобно отрезок АВ выбирать равным 100мм. Тогда длина отрезка БВ в дециметрах численно равна тангенсу угла БАВ. В нашем случае БВ=45мм., АВ=50мм. Следовательно, Хр = 45/50 = 0,90.

Аналогичным образом строятся графики зависимостей P = φ(S) и P = ψ(V) и определяются значения показателей y_P и z_P.

Значения коэффициентов C_{Pt} , C_{Ps} , C_{Pv} определяем одним из следующих способов:

1) Из протокола наблюдений: если например t, S или V в каком-то опыте равен 1, то, согласно уравнениям (2), значение C_P будет числено равно значению усилия в этом опыте. Например, для нашего опыта имеем $P_{t=1}$=76кг, следовательно, и C_{Pzt}=76.
2) Из графиков зависимостей (2). Если параметр t, S или V равен 1, то значение ординаты точки с абсциссой 1 численно равно величине C_P. Этот способ точнее, т.к. учитывает случайные погрешности опыта. Так, для нашего опыта из рис.6 имеем C_{Pzt}=73.
3) Аналитически, из уравнений (2), т.е.

$$C_{Pxt} = \frac{P_{Xi}}{t_i^{X_{Px}}};\ C_{Pxs} = \frac{P_{Xi}}{S_i^{Y_{Px}}};\ C_{Pxv} = \frac{P_{Xi}}{V_i^{Z_{Px}}};$$

$$C_{Pyt} = \frac{P_{Yi}}{t_i^{X_{Py}}};\ C_{Pys} = \frac{P_{Yi}}{S_i^{Y_{Py}}};\ C_{Pyv} = \frac{P_{Yi}}{V_i^{Z_{Py}}};$$

$$C_{Pzt} = \frac{P_{Zi}}{t_i^{X_{Pz}}};\ C_{Pzs} = \frac{P_{Zi}}{S_i^{Y_{Pz}}};\ C_{Pzv} = \frac{P_{Zi}}{V_i^{Z_{Pz}}};$$

где i – номер опыта в каждой серии.

Для нашего случая имеем

$$C_{Pz_t} = \frac{130}{2^{0,9}} = 71.$$

Далее определяем коэффициент C_P уравнения (1) для каждой составляющей:

$$C_{P_{X1}} = \frac{C_{P_{Xt}}}{S_c^{y_{Px}} \cdot V_c^{z_{Px}}};\ C_{P_{X2}} = \frac{C_{P_{Xs}}}{t_c^{x_{Px}} \cdot V_c^{z_{Px}}};\ C_{P_{X3}} = \frac{C_{P_{Xv}}}{S_c^{y_{Px}} \cdot t_c^{x_{Px}}};$$

$$C_{P_{Y1}} = \frac{C_{P_{yt}}}{S_c^{y_{Py}} \cdot V_c^{z_{Py}}};\ C_{P_{Y2}} = \frac{C_{P_{ys}}}{t_c^{x_{Py}} \cdot V_c^{z_{Py}}};\ C_{P_{Y3}} = \frac{C_{P_{y.м}}}{S_c^{y_{Py}} \cdot t_c^{x_{Py}}};$$

$$C_{P_{Z1}} = \frac{C_{P_{Zt}}}{S_c^{y_{Pz}} \cdot V_c^{z_{Pz}}}; \; C_{P_{Z2}} = \frac{C_{P_{Zs}}}{t_c^{z_{Pz}} \cdot V_c^{z_{Pz}}}; \; C_{P_{Z3}} = \frac{C_{P_{Zv}}}{S_c^{y_{Pz}} \cdot t_c^{x_{Pz}}}$$

Так как при проведении экспериментов и обработке результатов неизбежны погрешности, то в общем виде для каждой составляющей $C_{P1} \neq C_{P2} \neq C_{P3}$. Поэтому находим значение C_P для каждой силы:

$$C_{Pcp} = \frac{C_{P1} + C_{P2} + C_{P3}}{3}.$$

Определив, таким образом, численные значения коэффициентов и показателей в уравнениях (1) для каждой силы, получаем формулы для определения величины составляющих усилия резания в зависимости от глубины резания, подачи и скорости.

2. Аналитический метод

Если точки не ложатся строго на кривую, она проводится приближенно с таким расчетом, чтобы сумма квадратов отклонений их от этой прямой была минимальной (метод наименьших квадратов), т.е.

$$\sum_{i=1}^{N} [y_i - f(x_i)]^2 = \min.$$

Разность $y_i - f(x_i)$ – есть отклонение по ординате экспериментальной точки от заменяющей кривой. Для уравнения прямой в логарифмических координатах $\lg P = \lg C + x_P \cdot \lg t$ основное условие примет вид

$$S^* = \sum_{i=1}^{N} [\lg P_i - (\lg C + x_P \cdot \lg t_i)]^2 = \min.$$

Сумма S* будет минимальной, если её частные производные по параметрам C и x_P равны нулю:

$$\frac{\partial S^*}{\partial C} = 0; \; \frac{\partial S^*}{\partial x_P} = 0.$$

Произведя дифференцирование и соответствующие преобразования, получим систему уравнений

$$\begin{cases} \sum_{i=1}^{N} \lg P_i - N \cdot \lg C - x_p \cdot \sum_{i=1}^{N} \lg t_i = 0 \\ \lg t_i \cdot \sum_{i=1}^{N} \lg P_i - \lg C \cdot \sum_{i=1}^{N} \lg t_i - x_p \sum_{i=1}^{N} \lg^2 t_i = 0 \end{cases}$$

в которых N – число опытов в серии. Решая систему уравнений, получим формулы для определения искомых постоянной C и показателя x_P:

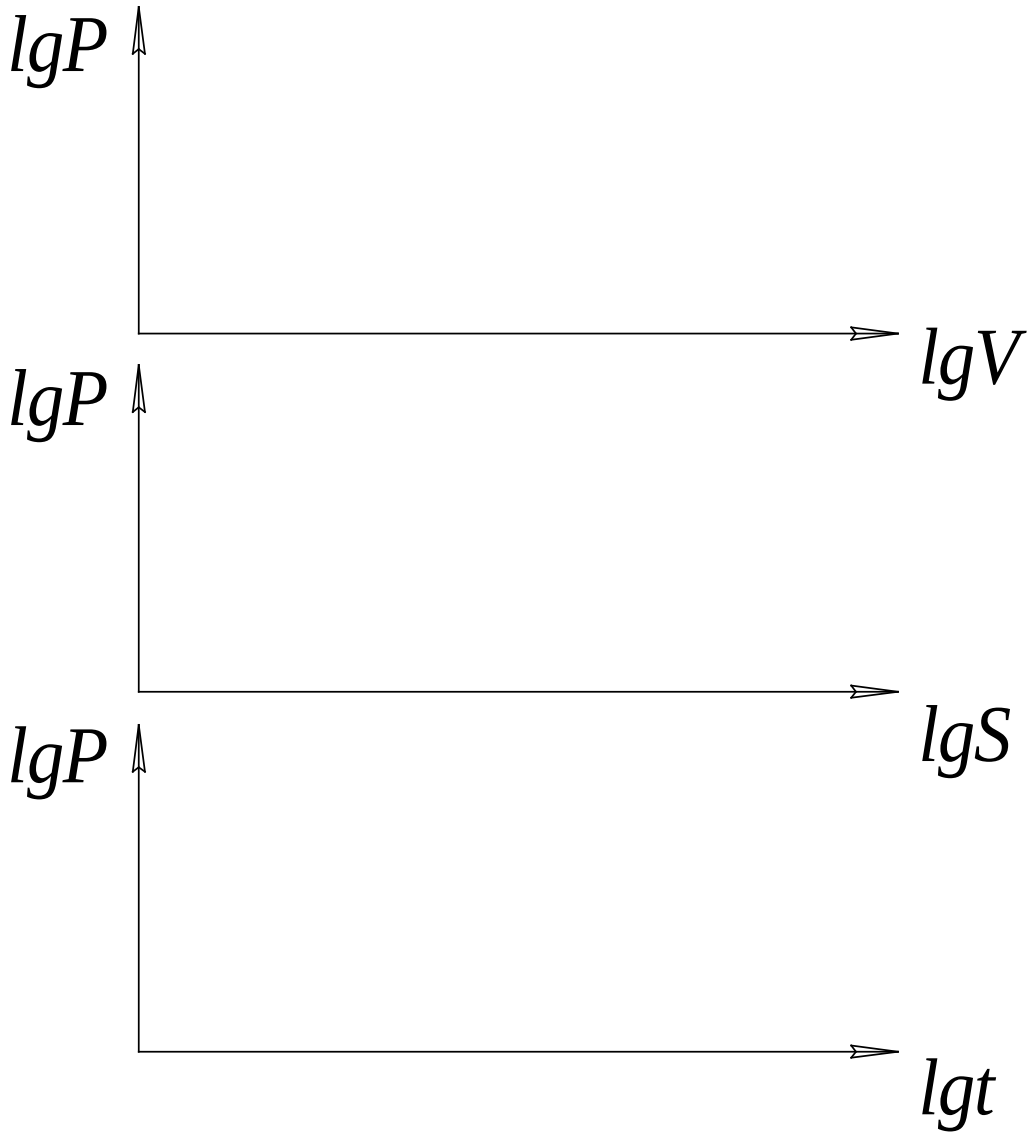
$$\lg C = \frac{\sum_{i=1}^{N} \lg P_i \cdot \sum_{i=1}^{N} \lg^2 t_i - \sum_{i=1}^{N} \lg t_i \cdot \sum_{i=1}^{N} \lg P_i \cdot \lg t_i}{N \sum_{i=1}^{N} \lg^2 t_i - (\sum_{i=1}^{N} \lg t_i)}; \quad (5)$$

$$x_p = \frac{N \sum_{i=1}^{N} \lg P_i \cdot \lg t_i - \sum_{i=1}^{N} \lg t_i \cdot \sum_{i=1}^{N} \lg P_i}{N \sum_{i=1}^{N} \lg^2 t_i - (\sum_{i=1}^{N} \lg t_i)^2}. \quad (6)$$

Протокол опытов

№ п/п	V, м/мин.	S, мм/об.	t, мм.	E, мВ	P, кг.	Примечание

К получению формулы P = f(V, S, t) графоаналитическим методом



Содержание и оформление отчета

Отчет по лабораторной работе должен включать:

7. Название лабораторной работы;
8. Цель работы;
9. Протоколы опытов;
10. Графики зависимостей;
11. Расчетные формулы;
12. Заключение.

Контрольные вопросы

1. С какой целью производится измерение усилий резания?
2. На какие составляющие разлагается общее усилие резания и для чего?
3. Расскажите об устройстве и принципе работы токарного динамометра?
4. Как производится тарировка динамометра?
5. Как производится обработка результатов динамометрических измерений в логарифмической системе координат?
6. Что оказывает наибольшее влияние на силы резания: глубина резания t, подача S или скорость V.

Лабораторная работа № 3

ИССЛЕДОВАНИЕ ТЕМПЕРАТУРНОГО ПОЛЯ В РЕЗЦЕ МЕТОДОМ ЭЛЕКТРОМОДЕЛИРОВАНИЯ

Целью настоящей работы является ознакомление студентов с методикой определения температурного поля в резце, основанной на электромоделировании температурных полей.

Основные положения метода электромоделирования

Практически применяются две разновидности моделирования как способа решения дифференциального уравнения теплопроводности. В первой – процесс распространения теплоты в твердом теле изучается на основе анализе сходного процесса распространения теплоты в модели. Во второй – изучение процесса теплопроводности в реальном теле основывается на анализе принципиально другого физического явления, имеющего, однако, сходное математическое описание.

Примером моделирования первой разновидности является изучение теплового процесса в металле под действием лазерного импульса взамен импульса теплоты, которым является процесс резания отдельным зерном при шлифовании. Возможность управлять интенсивностью лазерного импульса, его размерами и длительностью взаимодействия на обрабатываемый металл позволяет изучить структурные изменения в поверхностных слоях заготовки, температуры и других показателей процесса и этим путем выяснить некоторые закономерности, которые могут иметь место в реальном шлифовании.

Вторая разновидность моделирования базируется на сходстве математического описания процессов распространения теплоты и электрического поля.

Известно, что процесс распространения тепла в плоском процессе при установившемся теплообмене описывается уравнением:

$$\frac{\partial^2\Theta}{\partial x^2}+\frac{\partial^2\Theta}{\partial y^2}=0,$$

где Θ - температура;

x, y – координаты точки резца.

Аналогично записывается уравнение распространения электрического тока в электропроводной двухмерной среде:

$$\frac{\partial^2 U}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 U}{\partial y^2} = 0,$$

где U - температура;

x, y – координаты точки в электропроводной среде.

Следовательно, если при определенных условиях изучать распространение электрического тока на модели, то можно судить о распространении теплоты в интересующем нас теле. Актуальность такой задачи видна из следующего примера. Представим, что нам необходимо выяснить температурное поле в режущем инструменте.

Нетрудно понять, что с этим полем связаны работоспособность инструмента, его тепловые деформации в процессе изготовления деталей, а значит и точность последних. Но резец имеет ограниченные размеры, и длина его контакта со стружкой, откуда поступает основной поток тепла, измеряется всего одним-тремя миллиметрами, редко больше. Если же сделаем большую электрическую модель из другого материала и обеспечим условия подобия теплового процесса в резце и электрического – в модели, то мы решим нашу задачу значительно проще, чем если бы пытались измерить температуры в реальном инструменте.

Условия подобия процессов в реальном объекте и модели состоят в следующем:

а) модель должна быть геометрически подобна реальному объекту

б) должно быть обеспечено равенство безразмерных координат точек модели и

реального объекта;

в) должно иметь место равенство критериев подобия для модели и объекта.

При моделировании тепловых процессов используется критерий Кирпичева, представляющий собой в безразмерных системах интенсивность потока:

$$K_{\Theta} = \frac{qL_{\Theta}}{\lambda\Theta_m},$$

где q – интенсивность источника;

L_{Θ} - характерный размер;

λ – коэффициент теплопроводности;

Θ_m - некоторое значение температуры, принятое за масштаб.

Потребность в Θ_m возникает потому, что при описании подобных явлений используют безразмерные значение температуры $\psi_{\Theta} = \frac{\Theta}{\Theta_m}$, представляющие собой отношения фактических температур к масштабной температуре. При равенстве соответствующих критериев подобия $K_{\Theta} = K_U$, $\frac{qL_{\Theta}}{\lambda\Theta_m} = \frac{\delta L_U}{\gamma U_m}$ и при геометрическом подобии безразмерный потенциал на модели $\psi_U = \frac{U}{U_m}$ численно равен безразмерной температуре ψ_{Θ} в сходной точке твердого тела. А это значит, что если мы соответствующим образом выберем длину источника тока L_U на модели, плотность тока δ, масштабный потенциал U_m, то, изучая поле потенциалов на модели, можно сделать заключение о температурном поле в нагреваемом объекте. Переход от безразмерной температуры ψ_{Θ} к температуре в градусах Θ осуществляется по результатам моделирования с помощью соотношения:

$$\Theta = \Theta_m \psi_{\Theta=} \frac{qL_{\Theta}}{\lambda K_U} \psi_{\Theta},$$

где $K_U = \frac{\delta L_U}{\gamma U_m}$ - коэффициент формы модели.

Моделирование тепловых процессов в технологических системах выполняется с помощью сплошных сред (электропроводная бумага) или сеток из активных сопротивлений и емкости так называемых RC – сеток.

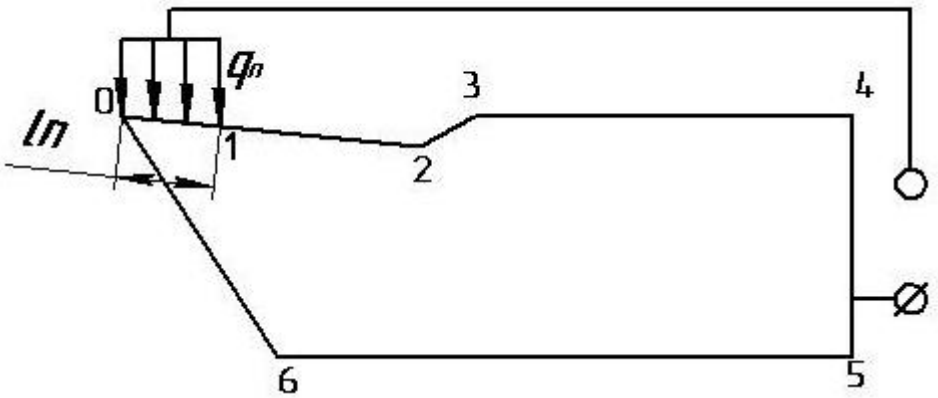
Моделирование успешно применяется и для решения некоторых вопросов наладки технологических систем. Так, например, при решении вопроса о наладке процесса выглаживания шаровых поверхностей на телах качения с помощью моделирования на RC – сетках удалось определить температуру в месте пересечения траекторий инструмента на обрабатываемой поверхности и отыскать условия, когда эта температура будет иметь примерно постоянное значение на всей поверхности шара. Это, в свою очередь, обеспечивает равномерность твердости и других свойств металла, связанных с температурой в поверхностных слоях выглаженного шара.

Мы рассматривали моделирование на основе электротепловой аналогии, то есть на основе сходства математического описания процессов распространения теплоты и электрического поля в твердых телах. Для моделирования может применяться также гидротепловая аналогия, когда используется сходство законов распространения тепла и движения жидкости. Вследствие громоздкости устройств такого рода метод гидротепловой аналогии используется значительно реже метода электротепловой аналогии.

Расчетная схема теплового процесса

1. Полагаем, что тепловой процесс в резце является плоским (двухмерным). Это, например, имеет место при свободном резании, когда длина режущей кромки равна ширине изделия.
2. Теплофизические коэффициенты считаем не зависящими от температуры
3. Тепловой поток полагаем установившимся. На рисунке приведена геометрическая модель резца в главной секущей плоскости. Предусмотрено, что на длине контакта резца со стружкой $l_п$ в резец поступает равномерно распределенный тепловой поток

$$\lambda\left(\frac{\partial\Theta}{\partial n}\right)_{0-1} = q_n = const$$



На участке 4-5, то есть в месте крепления резца в резцедержателе, в первом приближении можно считать, что температура поддерживается постоянной

$t_{1\text{-}5}=t_o=const$, равной температуре окружающей среды. Все остальные участки инструмента принимаем адиабатными, то есть не отдающими тепло в окружающую среду.

Содержание работы

1. Измерение геометрических параметров и формы резца, выданного преподавателем. Вычерчивание резца в заданном масштабе.
2. Работа на токарном станке по режимам, заданным преподавателем. Измерение длины контакта резца по задней и передней граням.
3. Переход к модели резца, выполненной из электропроводной бумаги. Составление электрической схемы моделирования
4. Измерение параметров электрической модели:

   - длины контакта $l_п$ и $l_з$;
   - напряжения в вершине резца U_m;
   - сопротивления электрической модели $R_Э$;
   - электрического тока I.

5. Нахождение на модели линий равных потенциалов с потенциалами:

$U=U_{m\psi}$, где $\psi_1=0,8$; $\psi_2=0,6$; $\psi_3=0,4$.

6. Переход от безразмерных величин, полученных на электрической модели, к температурам:

$$\Theta_m = \frac{qL_\Theta}{\lambda K_U}, \text{ где } K_U = \frac{\delta L_U}{\gamma U_m}.$$

Плотность тока находится как отношение тока к длине контакта, то есть $\delta = \frac{I}{I_n}$ или $\delta = \frac{I}{I_з}$. Электропроводность материала модели $\gamma_э$ определяется как величина, обратная сопротивлению электропроводной бумаги, то есть $\gamma_Э = \frac{1}{R_Э}$. Интенсивность теплового потока q можно определить следующим образом:

$$q = \frac{Q}{L_\Theta b} = \frac{F\nu}{L_\Theta b} = \frac{0{,}25\sigma_B L_\Theta b\nu}{L_\Theta b} = 0{,}25\sigma_B\nu,$$

где σ_B - временное сопротивление материала заготовки, Н/м^2;

ν - скорость резания, м/с;

L_Θ - длина контакта, м;

b – ширина отрезного резца, м

7. Изображение на эскизе резца температурного поля и расчет изотерм.

Контрольные вопросы

1. На каком принципе основано изучение тепловых явлений в резцах методом моделирования?
2. Как задаются граничные условия при моделировании?
3. Как влияет коэффициент теплопроводности резца на температуру его поверхности?

Лабораторная работа № 4

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ТЕМПЕРАТУРЫ РЕЗАНИЯ ПРИ ТОЧЕНИИ

Температура, возникающая в зоне резания, существенно влияет на износ и стойкость режущих инструментов, на качество обработанной поверхности и точность обрабатываемой детали. Поэтому изучение тепловых явлений составляет важную задачу науки о резании.

Многочисленными экспериментальными исследованиями показано, что средняя температура Θ в зоне резания удовлетворительно описывается уравнением типа:

$$\Theta = C_{\Theta} \cdot t^{X\Theta} \cdot S^{Y\Theta} \cdot V^{Z\Theta} \quad (1)$$

где C_{Θ} – постоянный коэффициент, зависящий от свойств обрабатываемого материала, геометрии и материала режущей части инструмента, наличия и вида охлаждения, диаметра обработки и других факторов;

X_{Θ}, Y_{Θ}, Z_{Θ} – показатели, определявшие степень влияния на температуру Θ элементов режима резания: глубины t, подачи S и скорости V.

Цель работы: Исследовать зависимость средней температуры резания при точении от элементов режима резания: глубины t, подачи S и скорости V.

Содержание работы:

1. Экспериментальное определение зависимости температуры резания от глубины t, подачи S и скорости V.

2. Построение графиков зависимости температуры резания от исследуемых параметров.

3. Вывод обобщенного уравнения исследуемых зависимостей типа уравнения (1).

Измерение температуры резания методом естественной термопары

Как известно из курса физики, между свободными концами электродов, изготовленных из двух разнородных металлов, имеющих общую точку спая, возникает разность электрических потенциалов всякий раз, когда температура спая будет отличаться от температуры свободных концов. Если свободные

концы электродов замкнуть электрическим проводником, то в такой цепи возникает электрический ток. При этом термоэдс будет тем больше, чем больше разность температур нагретого спая и холодных концов. При резании металлов на площадках контакта инструмента с обрабатываемой заготовкой возникают высокие, до нескольких тысяч атмосфер, давления, которые в сочетании с высокими, в сотни градусов, контактными температурами, размягчают металл в зоне резания, обеспечивают большую плотность контакта. Так как при резании в контакте находятся идеально чистые (неокисленные) поверхности, то можно считать, что в электрическом отношении такой контакт эквивалентен спаю. Следовательно, резец и деталь в данном случае - электроды термопары.

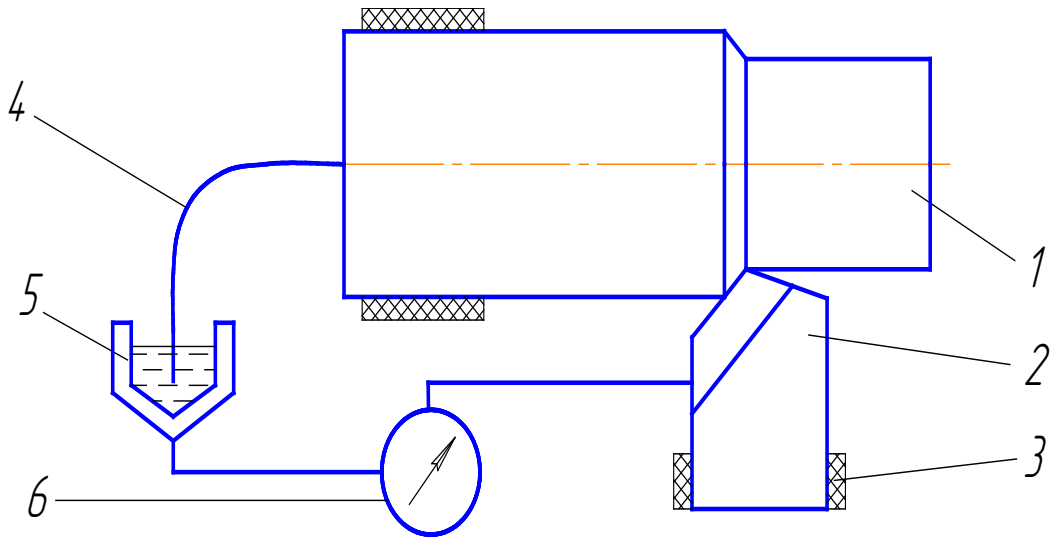


Рис.1. Схема измерения температуры резания методом естественной термопары.

Измерение температуры резания схематично показано на рис.1. Электродами термопары являются обрабатываемая деталь 1 и резец 2, которые специальными прокладками 3 изолируются от массы станка. Соединение холодных концов электродов осуществляется посредством гибкого валика-проводника 4, ртутный контакт 5 и гальванометр 6. Чтобы выразить термоэдс регистрируемую гальванометром 6, через температуру резания в градусах, необходимо воспользоваться тарировочными графиками, отражающими зависимость между показаниями гальванометра и соответствующими им значениями температуры резания.

Тарирование заключается в том, что для конкретной термопары деталь-резец сроят график, показывающий значения температуры соответствующие различным отклонениям стрелки милливольтметра, включенного в цепь (рис.2).

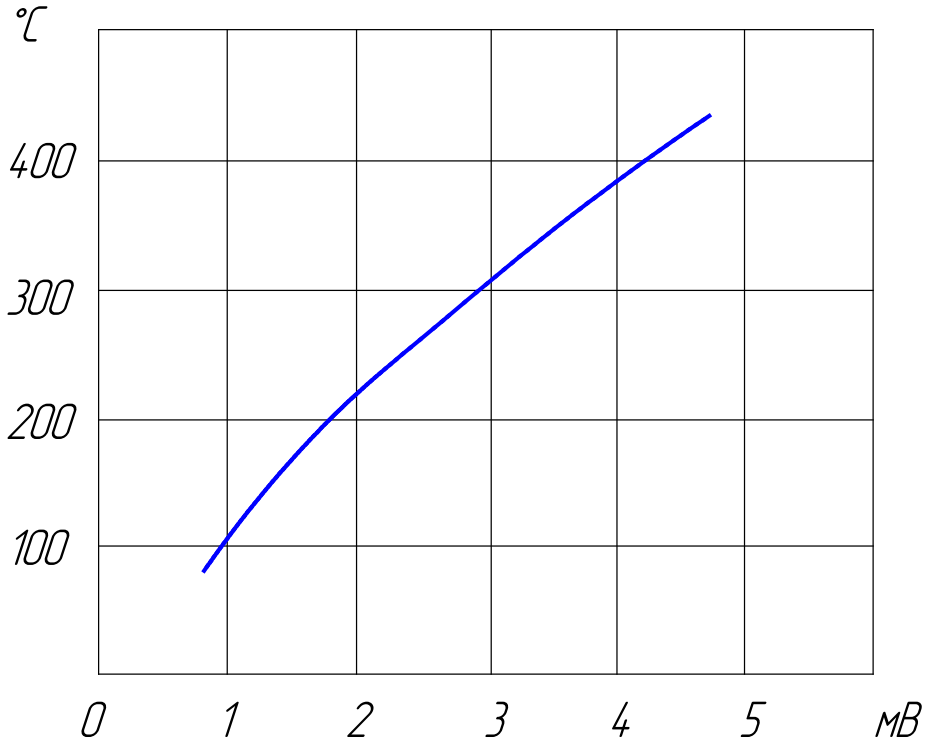


Рис.2.

Тарировка производится с помощью нагревательных приборов (муфельная печь, песочная ванна и т.п.) и ранее протарированной контрольной термопарой.

Процесс тарировки естественных термопар можно ускорить и упростить, если воспользоваться уравнением В.В. Цохадзе:

$$E = B \cdot \exp(-b / \Theta+273), \quad (2)$$

которое справедливо для любой пары металлов, находящихся в контакте.

Для того, чтобы конкретизировать формулу (2) применительно, к интересующей нас термопаре, достаточно провести два опыта с измерением величин Θ и E. Это позволит определить коэффициенты B и b, и следовательно написать уравнение градуировочной кривой.

В таблице I приведены коэффициенты B и b к градуировочным кривым для некоторых термопар.

Таблица 1

Коэффициенты в формуле (2), описывающей градуировочные кривые естественных термопар

Изделие из стали	Инструмент из сплава	Пределы температур	B	b
40	Т30К4	130-1150	26,0	1273
40	Т15К6	20-1150	31,3	1101
45	Т15К6	20-600	26,8	890
ШХ15	Т15К6	20-650	30,3	1000
40	Т5К10	20-1100	40,8	1133
40	ВК8	20-1100	40,2	1083
40	ВК6	20-1100	48,2	1127

Экспериментальное определение температуры резания

Определение зависимости температуры резания от элементов режима обработки производится при точении стальной заготовки диаметром 60-100мм. на токарно-винторезном станке 1К62 проходным резцом оснащенным пластиной твердого сплава. Геометрические параметры инструмента и режимы резания задаются преподавателем.

Проводится три серии опытов:

1. Определяется температура резания при различных значениях t и постоянных $V=V_c$ и $S=S_c$.
2. Определяется температура резания при различных значениях S и постоянных $V=V_c$ и $t=t_c$.
3. Определяется температура резания при различных значениях V и постоянных $t=t_c$ и $S=S_c$.

Результаты экспериментов заносятся в протокол исследований.

Протокол исследований

№ серии опытов	№ опыта	Диаметр заготовки	мм.	Элементы режима резания				Показания гальванометра, мВ	Температура, Θ °С	Примечание
				глубина резания, мм	подача, мм/об.	число оборотов об/мин.	скорость резания, м/мин.			
			D	t	S	n	V			

Обработка результатов

1. Графоаналитический метод

По результатам эксперимента строятся в двойной логарифмической системе координат (на логарифмической бумаге или при помощи логарифмической линейки) графики частных зависимостей

$$\Theta = C_{\Theta t} \cdot t^{X\Theta},\ \Theta = C_{\Theta s} \cdot S^{Y\Theta},\ \Theta = C_{\Theta v} \cdot V^{Z\Theta},\ (3)$$

которые в двойной логарифмической системе координат, представляют собой уравнения прямых, где согласно уравнению (1):

$$C_{\Theta t} = C_{\Theta} \cdot S_C^{Y\Theta} \cdot V_C;$$
$$C_{\Theta s} = C_{\Theta} \cdot t_C^{X\Theta} \cdot V_C^{Z\Theta};$$
$$C_{\Theta v} = C_{\Theta} \cdot t_C^{X\Theta} \cdot S_C^{Y\Theta}.\ (4)$$

Если результаты экспериментов не ложатся строго на прямую, она проводится приближенно с таким расчетом, чтобы сумма квадратов отклонений их от этой прямой была минимальной (метод наименьших квадратов). Если при этом результат какого-то одного опыта резко выпадает из прямой, которая удовлетворительно проходит через остальные точки, его при проведении прямой не учитывают. При этом предпочтение отдается результатам, где значения аргумента (t, S или V) выше, т.к. в этих опытах относительная погрешность проведения эксперимента и измерений меньше.

Прологарифмировав уравнения (3), мы получим линейные уравнения вида:

$$\lg\Theta = \lg C_{\Theta t} + x_{\Theta} \cdot \lg t;$$
$$\lg\Theta = \lg C_{\Theta s} + x_{\Theta} \cdot \lg S;$$
$$\lg\Theta = \lg C_{\Theta v} + x_{\Theta} \cdot \lg V\quad (5)$$

или в общем виде

$$y = kx + b.$$

Следовательно в логарифмической системе координат зависимости (3) будут изображаться в виде прямых наклонных линий. Тангенс угла наклона этих линий к оси абсцисс есть показатель степени при соответствующем аргументе. Значение температуры при аргументе, равном единице, численно равно соответствующему коэффициенту C из системы (3). В случае, если исследуемые значения аргумента существенно отличаются от единицы (меньше

0,61 иди больше 10), значения коэффициентов С вычисляются непосредственно из уравнений (3), т.е.

$$C_{\Theta t} = \frac{\Theta_i}{t_i^{X_\Theta}};\ C_{\Theta S} = \frac{\Theta_i}{S_i^{Y_\Theta}};\ C_{\Theta v} = \frac{\Theta_i}{V_i^{Z_\Theta}};\quad (6)$$

где индекс i обозначает порядковый номер опыта в серии.

Например в результате проведения четырех первых опытов серии получили:

при t_1 = 0,5мм. Θ_1 = 270°С

при t_2 = 1мм. Θ_1 = 335°С

при t_3 = 1,5мм. Θ_1 = 420°С

при t_4 = 0,5мм. Θ_1 = 445°С

Значения Θ_1, Θ_2, Θ_3 и Θ_4 наносятся на график в логарифмических координатах в виде точек 1, 2, 3, 4 (рис.3), которые соединяются прямой АБ. Тангенс угла БАВ численно равен показателю X_Θ при глубине резания t в уравнениях (3) и (1).

Наиболее удобно отрезок АВ выбирать равным 100мм. Тогда длина отрезка БВ в дм численно равна tg<БАВ. В нашем случае БВ = 0,36дм.

$$X_\Theta = 0{,}36.$$

Значение коэффициента $C_{\Theta t}$ можно определить следующим способом.

1. Из протокола, $C_{\Theta t} = \Theta_2$ = 340 (при t=1). Этим способом следует пользоваться, когда точка лежит на прямой АБ.
2. Графически, $C_{\Theta t} = \Theta_2 + \Delta_2$ = 355 (при t=1), когда точка Θ_2 лежит на прямой.
3. Аналитически, по формуле (6), причем из протокола берётся то значение Θ_i, которое лучше других ложится на прямую на графике, например, точка Θ_3.

$$C_{\Theta t} = \frac{420}{1{,}5^{0{,}36}} = \frac{420}{1{,}15} = 365.$$

Более точно

$$C_{\Theta t} = \frac{\Theta_i \pm \Delta_i}{t_i^{X_\Theta}} = \frac{\Theta_3 - \Delta_3}{t_3^{X_\Theta}} = 366.$$

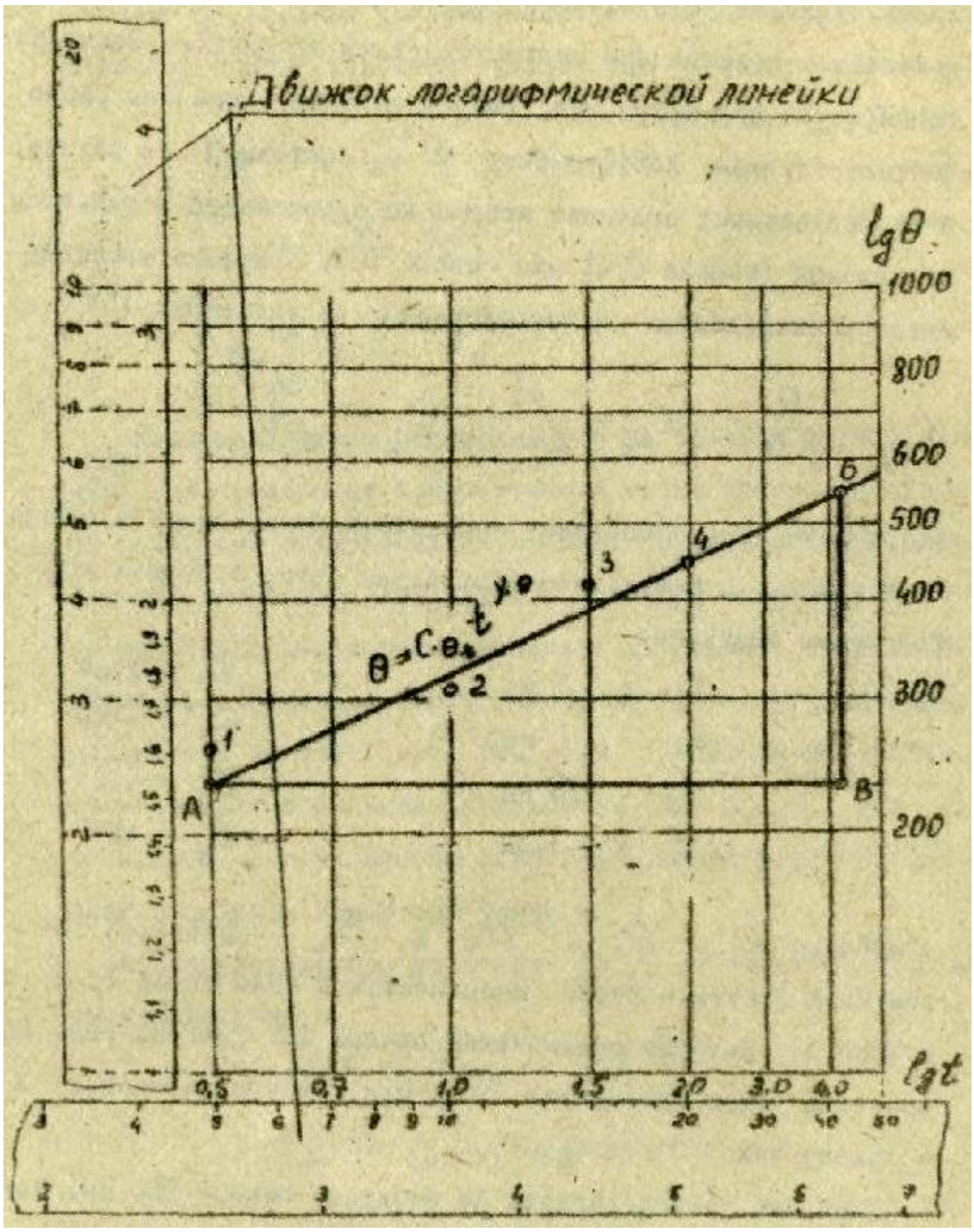


Рис.3. Пример графического изображения зависимости Θ = f (t).

Далее определяем коэффициент C_Θ уравнения (1) по формулам, вытекающим из выражений (4):

$$C'_\Theta = \frac{C_{\Theta t}}{S_C^{Y\Theta} \cdot V_C^{Z\Theta}}; \quad C''_\Theta = \frac{C_{\Theta s}}{t_C^{X\Theta} \cdot V^{Z\Theta}}; \quad C'''_\Theta = \frac{C_{\Theta v}}{t_C^{X\Theta} \cdot S_C^{Y\Theta}}. \quad (7)$$

Так как при проведении экспериментов и обработке результатов неизбежны погрешности, то в общем виде

$C_\Theta' \neq C_\Theta'' = C_\Theta'''$.

Поэтому находим среднее значение

$$C_\Theta = \frac{1}{3} \cdot \left(C_\Theta' + C_\Theta'' + C_\Theta'''\right). \quad (8)$$

Определив численные значения C_Θ, X_Θ, y_Θ, z_Θ и подставив их в уравнение (1), получаем формулу для определения средней температуры резания в зависимости от глубины резания, подачи и скорости.

2. Аналитический метод

В основе метода наименьших квадратов лежит следующее положение. Наилучшее приближение аппроксимирующей функции, например, Q=f(t) к экспериментальным данным будет в том случае, когда сумма квадратов отклонений расчетных значений $f(t_1)$, $f(t_2)$,…$f(t_n)$ от экспериментальных Θ_1, Θ_2 …. Θ_n является минимальной, т.е.

$$\sum_{i=1}^{n} \left[\Theta_i - f(t_i)\right]^2 = \min.$$

Разность $\Theta_i - f(t_i)$ в выражении есть отклонение по ординате экспериментальной точки от заменяющей кривой. Для уравнения кривой в логарифмических координатах

$\lg\Theta = \lg C_\Theta + X_\Theta \cdot \lg t$ основное условие принимает вид

$$S^* = \sum_{i=1}^{n} \left[\lg\Theta_i - (\lg C_\Theta + X_\Theta \cdot \lg t_i)\right]^2 = \min.$$

Сумма S* будет минимальной, если её частные производные по параметрам C_Θ и X_Θ равны 0:

$$\frac{\partial S^*}{\partial C_\Theta} = 0; \quad \frac{\partial S^*}{\partial X_\Theta} = 0.$$

Производя дифферинцированние и соответствующее преобразование, получим систему уравнений

$$\sum_{i=1}^{N} \lg\Theta_i - N \cdot \lg C_\Theta - X_\Theta \cdot \sum_{i=1}^{N} \lg t_i = 0$$

$$\lg t_i \cdot \sum_{i=1}^{N} \lg\Theta_i - \lg C_\Theta \cdot \sum_{i=1}^{N} \lg t_i$$

в которых N – число опытов в серии. Решая систему уравнений, получим формулы для определения искомых постоянной C и показателя X_Θ:

$$\lg C_{\Theta} = \frac{\sum_{i=1}^{N} \lg \Theta_i \cdot \sum_{i=1}^{N} \lg^2 t_i - \sum_{i=1}^{N} \lg t_i \cdot \sum_{i=1}^{N} \Theta_i \cdot \lg t_i}{N \cdot \sum_{i=1}^{N} \lg^2 t_i - \left(\sum_{i=1}^{N} \lg t_i \right)^2}$$

$$X_{\Theta} = \frac{N \cdot \sum_{i=1}^{N} \lg \Theta_i \cdot \lg t_i - \sum_{i=1}^{N} \lg t_i \cdot \sum_{i=1}^{N} \lg \Theta_i}{N \cdot \sum_{i=1}^{N} \lg^2 t_i - \left(\sum_{i=1}^{N} \lg t_i \right)^2}$$

Требования техники безопасности

1. Перед работой изучается устройство и принцип действия лабораторной установки с естественной термопарой и требования техники безопасности работы на токарном станке.
2. Работа на станке осуществляется лаборантом, студенты при работе с лабораторной установкой должны неукоснительно соблюдать все его требования.
3. Без разрешения преподавателя запрещается трогать приборы, не относящиеся к данной работе.

Содержание и оформление отчета

1. Название работы.
2. Цель работы.
3. Результаты экспериментальных исследований.
4. Графики зависимости температуры от глубины резания, подачи и скорости главного движения.
5. Заключение по результатам работы.

Контрольные вопросы

1. Расскажите об измерении температуры резания методом естественной термопары.
2. Как производится тарировка термопары?
3. Как производится обработка результатов измерений?