

ДИНАМИЧЕСКИЕ ИСПЫТАНИЯ ЦИЛИНДРИЧЕСКИХ И ТОРЦЕВЫХ ФРЕЗЕРОВ.

Доцент А. М. Розенберг.

Работа выполнена по заданию техотдела Наркоммаша. Цель работы—определение данных, необходимых для подсчета мощностей и крутящих моментов при работе цилиндрических и торцевых фрезеров при различных режимах по сталям и чугунам.

Опыты проводились по следующим обрабатываемым материалам (табл. 1).

Таблица 1.

№	Наименование материала	Разрыв σ_B кг/мм ²	Удлинение δ_{10} %	Сжатие ψ %	Твердость по Бринелю H_B	Твердость по Роквеллу R_B	Ударная вязкость кгм/см ²
1	Сталь 1010—п	40,1	29,6—31,6	68,4—70	109—122	55—58	16
2	" 1020—п	44,6	26,4—30	61—64	118—124	66—70	14,6
3	" 1020—н	46,3	29—31	67,0	118—126	70	17,3
4	" 1035—п	62,1	20—21,5	43,7—46,5	163—166	78—83	4,37
5	" 1035—н	64,6	21,6	51,0	163—170	84—88	7,05
6	" 1040—п	64,4	20,0—20,6	46,0	170—174	86,5—89,5	2,8
7	" 1040—о	62,8	22,4—23,4	47,0	159—165	82,5—84,5	5,1
8	" 1040—н	65,8	21,3—22	53—55	174—183	87,5—88	5,85
9	" 1040—у	69,0	20	64,7	196—217	95—97	7,45
10	" 1050—о	78,0	12,5	24	212—223	95,5—96	1,19
11	" 5120—п	50,3	26,0—27,9	61,5—62,9	137—143	77—78	—
12	" 5120—н	50,3	27,5—27,9	69,7—70,4	134—143	74—78	13,4
13	" 5140—п	71,5	15,3—15,7	30—31	196—207	91,5—93	2,0
14	" 5140—о	71,3	16,3—19,3	46—47	192—207	93	3,13
15	" 5140—н	81,1	16—16,4	60,8	212—217	98,5—100,5	2,95
16	" 5145—п	74,0	16,8	29,3	210	92—93	4,1
17	" 3120—н	54,4	26,0	66,6	140—146	79—80	15,8
18	" 3140—п	80,3	14,7—15,7	39,5—41,6	223—228	96—97	5,75
19	" 3340—о	91,0	9,5	51,0	265	101—102	4,5
20	" 3340—у	106,0	11,5	57,7	311	106—109	5,62
21	Чугун № 1 (серый)	4,5—9,3	—	—	109—124	66—73	2,44
22	Чугун № 2 (перлитный)	25,0	—	—	212—223	95—96	1,94
23	Чугун № 3 (легирован.)	18,5	—	—	183—212	93—95	0,725
24	Чугун № 4 (легирован.)	7,65	—	—	137—156	80—85	0,75
25	Чугун № 5 (ковкий)	36,6—42,0	12,8	14,8	134—156	76—78	2,25
26	Бронза	—	—	—	81	60—62	1,19

В таблице 1 стали обозначены по американскому стандарту. Стоящие после номера стали индексы имеют следующее значение: п—прокат, о—отжиг, н—нормализация, у—улучшение.

Сталь 3340 перед отжигом и улучшением была прокована с сечения 100×100 мм до сечения 50×100 мм. Механические свойства определялись:

1. Временное сопротивление σ_B путем разрыва двух образцов каждого материала. Размер образцов для испытания на разрыв: диаметр 10 мм, расчетная длина 100 мм. Разрыв производился на 10/50 тонной машине Амслера Лаффона в лаборатории сопротивления материалов института.

2. Относительное удлинение определялось обычным путем.

3. Поперечное сжатие вычислялось как отношение разности площадей поперечного сечения образца до и после разрыва к сечению до разрыва. Образцы на разрыв вырезались из тех мест болванок, которые подвергались фрезерованию.

4. Твердость по Бринелю определялась на болванках в тех местах, где производилось фрезерование, причем определение твердости производилось как до фрезерования, так и после фрезерования. В табл. 1 даны крайние пределы колебания твердости. Твердость определялась шариком $d=10$ мм при нагрузке в 3000 кг на прессе Бринеля фирмы „Альфа“ в лаборатории сопротивления материалов института.

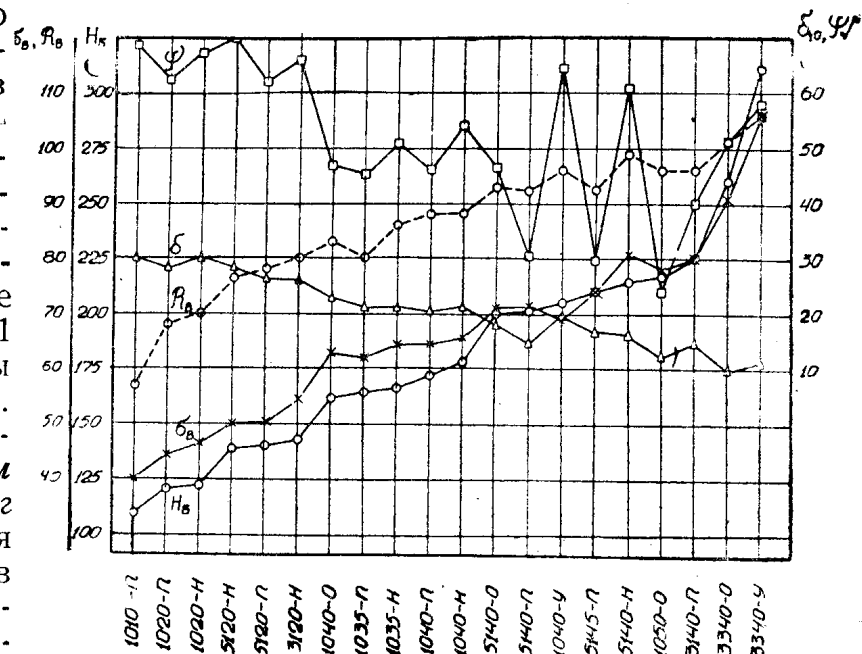


Рис. 1.

5. Твердость по Роквеллу определялась на дюрометре Роквелла в лаборатории резания металлов. Определение твердости производилось по шкале В (стальной шарик, нагрузка 100 кг), не менее чем в 5 местах. В таблице 1 показаны пределы колебания твердости.

6. Ударная вязкость определялась на образцах $10 \times 10 \times 65$ мм с надрезом глубиной 2 мм, с наклонными сторонами надреза под 45° друг к другу, с радиусом закругления вершины надреза 0,5 мм. Такая форма надреза была выбрана, как наиболее простая из употребляющихся, так как „общими методиками“ форма образца на излом вообще предусмотрена не была.

Образец вырезался непосредственно из фрезерованной поверхности болванки и подвергался испытанию на копре Шарпи в 15 кг в лаборатории сопротивления материалов Томского института инженеров железнодорожного транспорта. В том случае, когда с одного удара образец оказывался не изломан, по нему производился второй удар, причем работа второго удара приплюсовывалась к первой.

На рис. 1 дается сопоставление характеристики прочности различных сталей. Термическая обработка болванок (отжиг, нормализация, улучшение) производилась в металлографической лаборатории института, частью в муфельной электропечи типа Heraeus, частью в нефтяной печи. Контроль температуры велся при помощи термопар, электропечь кроме того была еще снабжена автоматической регулировкой т-ры. Режим термической обработки дан в табл. 2.

Размеры болванок стали для фрезерования были $50 \times 80 \times 300$ мм. Продолжительность нагрева при термообработке была взята в соответствии с литературными данными в зависимости от наименьшего размера болванки (50 мм) (Подопригора. Справочник термиста. Стр. 179. Зна-

Таблица 2.

№	Обрабатываемый материал	Термообработка	Температура нагрева	Охлаждение
1	Сталь 1020—н	Нормализация	880°	На воздухе
2	" 1035—н	тоже	880° - 900°	На воздухе
3	" 1040—о	отжиг	760—780°	С печью
4	" 1040—н	Нормализация	880°	На воздухе
5	" 1040—у	Улучшение	820°	В масле
			{ отпуск после за- калки 530°	На воздухе
6	" 1050—о	Отжиг	Проведен на Кузнецком металлургическом заводе. Режим не известен	
7	" 5120—н	Нормализация	860°	На воздухе
8	" 5140—о	Отжиг	860°	С печью
9	" 5140—н	Нормализация	855—860°	На воздухе
10	" 3120—н	Нормализация	880°—900°	На воздухе
11	" 3340—о	Отжиг	810°—820°	С печью
12	" 3340—у	Улучшение	800—810°	В масле
			{ отпуск после за- калки 580°	В масле

менский. Справочник металлста. Стр. 348. Чернышов. Испытание термическая обработка и применение стали. Стр. 73).

Время нагрева для достижения необходимой температуры было взято 1 ч. 30 минут. Выдержка при постоянной т-ре 1 час 30 минут. Масло для закалки машинное; температура масла 15—20°C. Охлаждение с печью при отжиге продолжалось в течение 18—24 часов, после чего болванки с температурой 100—120°C вынимались на воздух. Химсостав обрабатываемых материалов дан в таблице 3.

Данные химанализа чугунов № 1 и № 2 отсутствуют совершенно, так как чугуны были присланы Гипромашем без химсостава, производство же химанализа на месте не было предусмотрено. Термическая обработка ковкого чугуна (№ 5) была произведена в литейной ковкого чугуна автозавода им. Сталина со следующим режимом.

1. Нагрев до температуры 900°C—11—12 часов.
2. Выдержка при температуре 900—980°C—35 часов.
3. Спуск температуры с 900° до 750°C—28 часов.
4. Спуск температуры с 750° до 600°C—5 часов.
5. Охлаждение на воздухе.

Общая продолжительность цикла (1—4)—80 часов.

Все стали были получены в болванках сечением 100 × 100 мм.

Чугун № 1 и № 2 болванки 100 × 100 × 500 мм.

Чугун № 3 33 × 76 × 315 мм.

Чугун № 4 49 × 80 × 420 мм.

Чугун № 5.

На рис. 2—27 даются микрофотографии обрабатываемых материалов. К микрофотографиям даем заключение металлографической лаборатории института о структурных составляющих.

Сталь 1010—п (рис. 2). Ферритные зерна с отдельным включением островков перлита.

Сталь 1020—п (рис. 3). Ферритные зерна с отдельными включениями островков перлита.



Рис. 2.



Рис. 3.

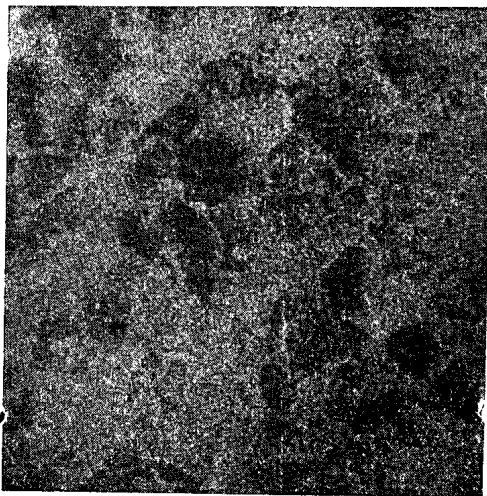


Рис. 4.

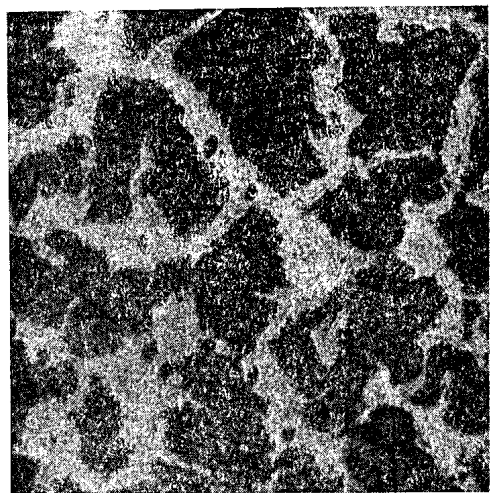


Рис. 5.

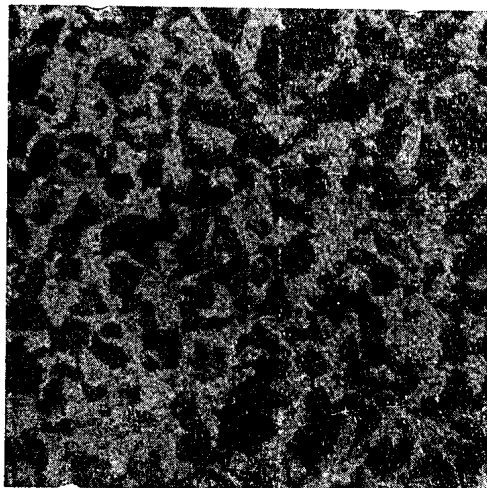


Рис. 6.

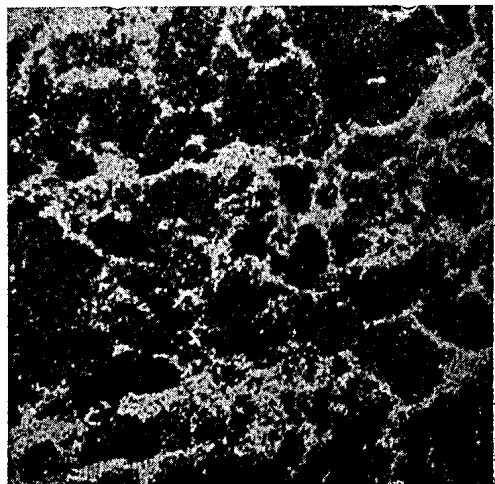


Рис. 7.

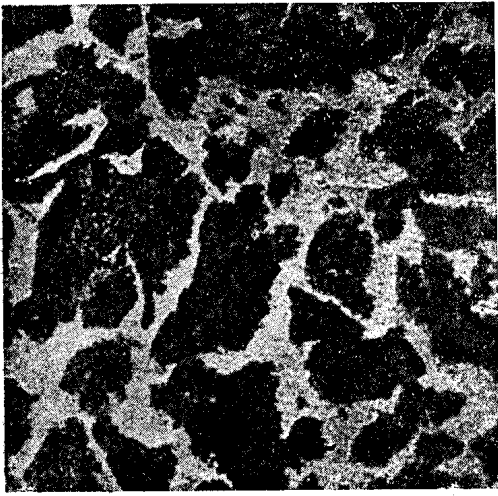


Рис. 8.

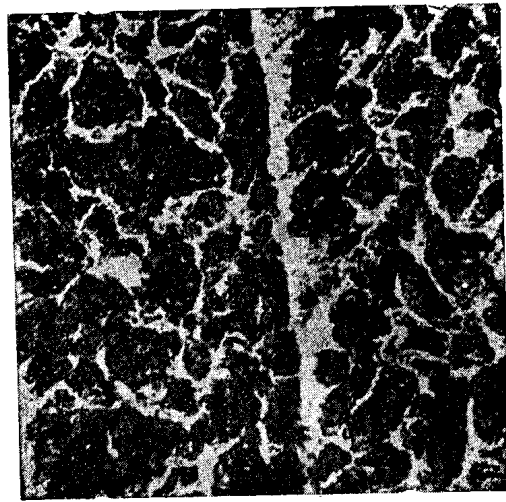


Рис. 9.

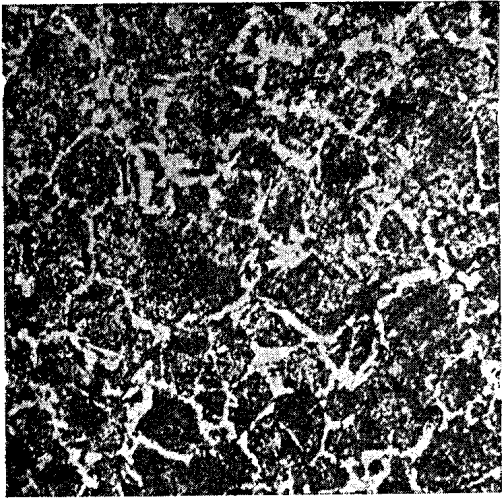


Рис. 10.

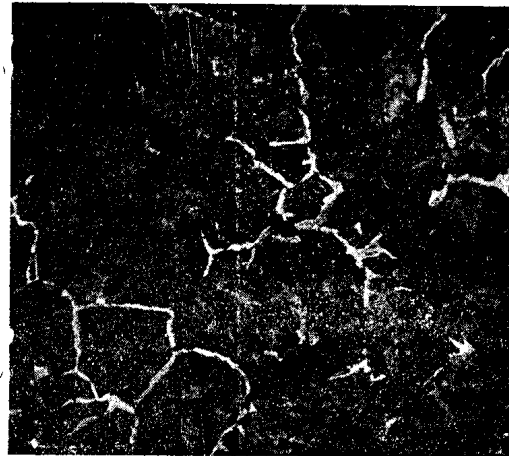


Рис. 11.

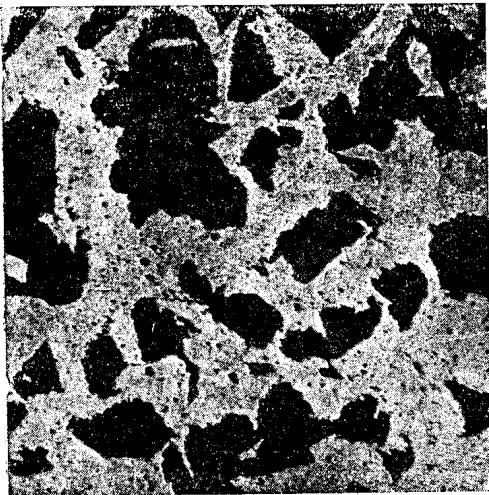


Рис. 12.

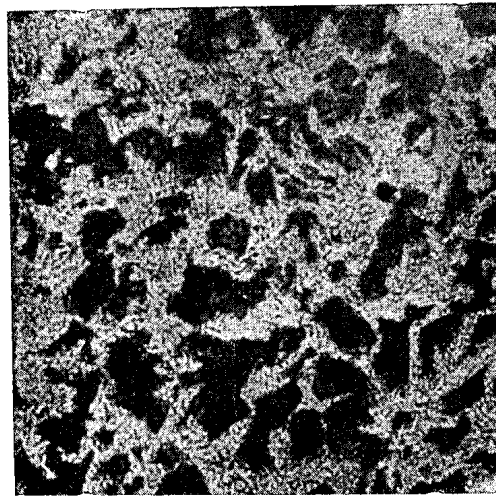


Рис. 13.



Рис. 14.

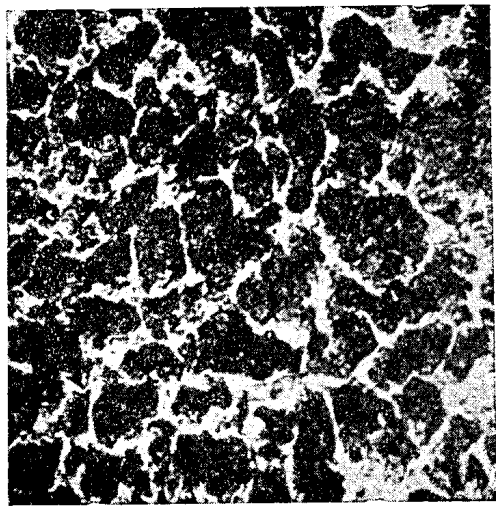


Рис. 15.

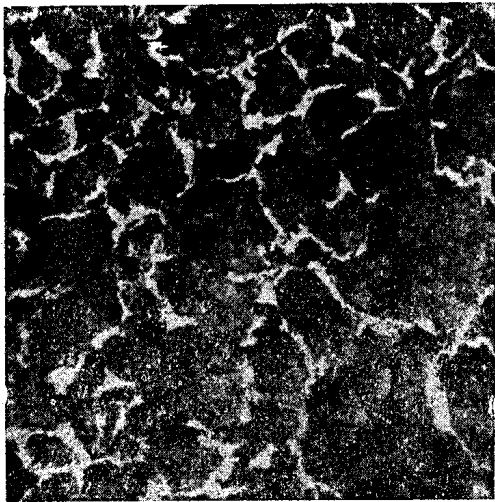


Рис. 16.

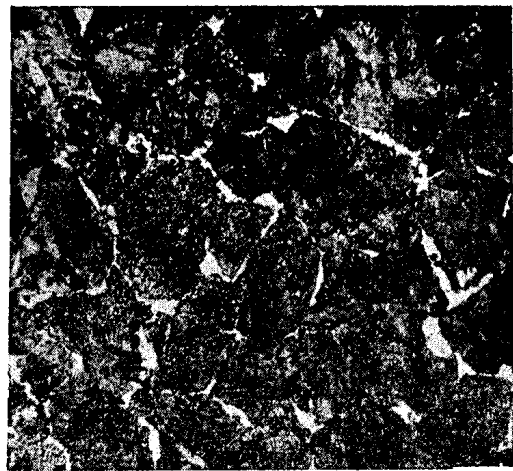


Рис. 17.

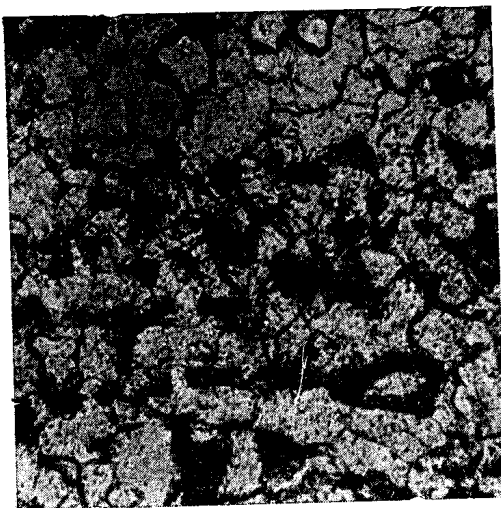


Рис. 18.

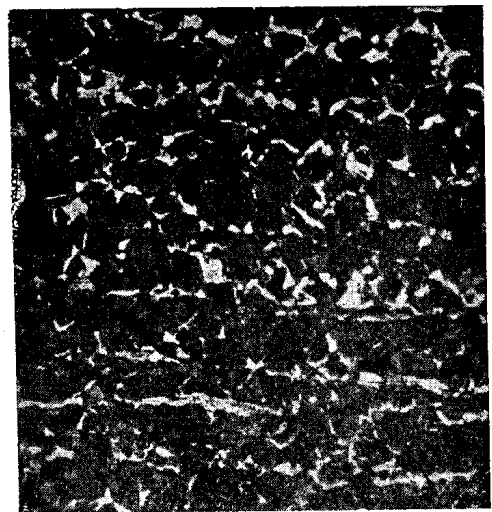


Рис. 19.

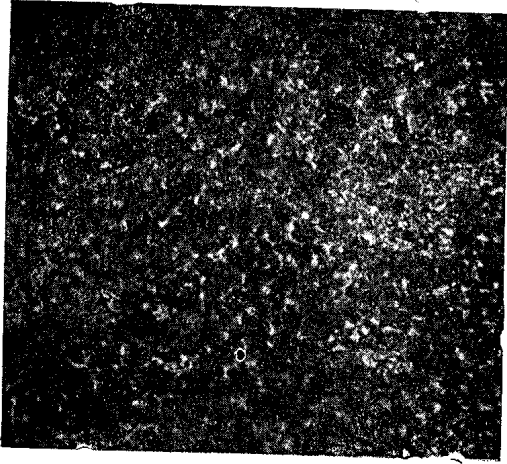


Рис. 20.



Рис. 21.



Рис. 22.

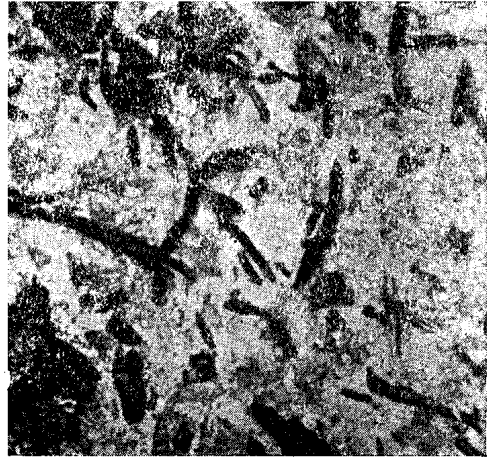


Рис. 23.

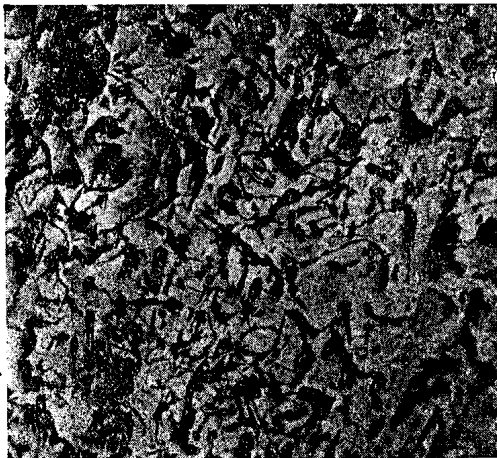


Рис. 24.

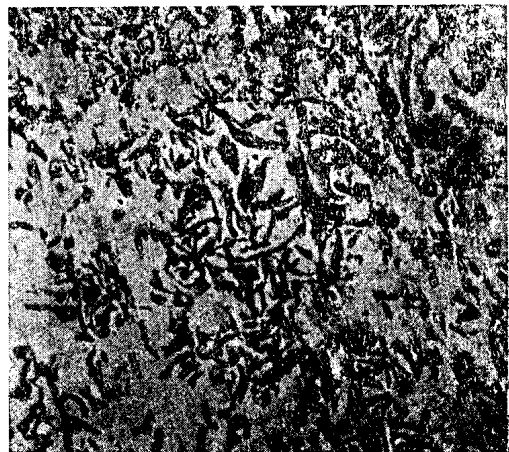


Рис. 25.

№	Наименование материала	Источник получения материала	Химический состав								Источник получения химанализа
			C	Mn.	Si	P	S	Ni	Cr		
1010	Сталь 1010	Завод „Красный Октябрь“.	0,13	0,44	0,17	0,015	9,018	—	—	—	Сертификат з-да Кр. Октябрь.
1020	1020	Чебл. Тракторн. з-д.	0,15	0,39	0,24	0,017	0,029	—	—	—	Хим. лабор. Томского Индустр. ин-та.
1035	1035	З-д „Красн Октябрь“.	0,35	0,62	0,3	0,023	0,023	—	—	—	Серт. з-да Кр. Октябрь.
1040	1040	Ч.Т.З.	0,35—0,45	0,5—0,8	0,17—0,37	<0,045	<0,045	<0,045	—	<0,2	Ост. 7123
1050	1050	Кузнецкий Металлург. завод.	0,54	0,64	0,22	0,01	0,2	—	—	—	Хим. лабор. К. М. за- вода.
5120	5120	Ч.Т.З.	0,16	0,39	0,29	0,02	0,035	—	—	0,68	Хим. лабор. Томского Индустр. ин-та
5140	5140	Ч.Т.З.	0,35	0,61	0,31	0,021	0,045	—	—	0,89	ОСТ 7124.
5145	5145	Ч.Т.З.	0,4—0,5	0,5—0,8	0,17—0,37	<0,01	<0,04	<0,04	0,3	0,8—1,1	
3120	3120	З-д „Кр. Октябрь“.	0,18	0,35	0,28	0,013	0,016	0,016	1,26	0,57	Серт. з-да Кр. Октябрь.
3140	3140	Ч.Т.З.	0,35—0,45	0,5—0,8	0,17—0,37	<0,04	<0,04	<0,04	1,0—1,5	0,45—0,75	ОСТ 7124
3340 (Э—10)	3340 (Э—10)	Завод Электро- сталь	0,39	0,38	0,34	0,023	0,018	0,018	3,44	1,33	Сертификат №412 ОСТ з-да Электросталь.
Чугун № 3 (легиров.)	Чугун № 3 (легиров.)	Автомобильн. им. Сталина	3,30	0,65	2,45	0,2	0,1	0,1	0,36	0,28	Данные лаборатории Автозавода им. Сталина.
Чугун № 4	Чугун № 4		3,41	0,61	2,36	0,179	0,131	0,131	0,24	0,23	
Чугун № 5 (ковк.)	Чугун № 5 (ковк.)		3,30	0,43	1,35	0,106	0,122	0,122	—	—	

Сталь 1020—н (рис. 4). Ферритное поле с отдельными включениями островков перлита.

Сталь 1035—п (рис. 5). Феррит плюс перлит.

Сталь 1035—н (рис. 6). Измельченный перлит плюс феррит.

Сталь 1040—п (рис. 7). Перлит плюс феррит. Перлит сорбитообразный.

Сталь 1040—о (рис. 8). Перлит плюс феррит.

Сталь 1040—н (рис. 9). Зерна перлита, окруженные сеткой феррита. Феррит по сечению шлифа распределен неравномерно. Имеются отдельные светловины в виде скопления феррита.

Сталь 1040—у (рис. 10). Мелкие зерна перлита, окруженные сеткой феррита.

Сталь 1050—о (рис. 11). Основное поле состоит из мелкопластинчатого перлита, окруженного тонкой, местами разорванной сеткой феррита.

Сталь 5120—п (рис. 12). Крупные зерна перлита и феррита.

Сталь 5120—н (рис. 13). Измельченный перлит, окруженный ферритом.

Сталь 5140—п (рис. 14). Крупные зерна перлита, окруженные тонкой разорванной сеткой феррита. Перлит мелкопластинчатый.

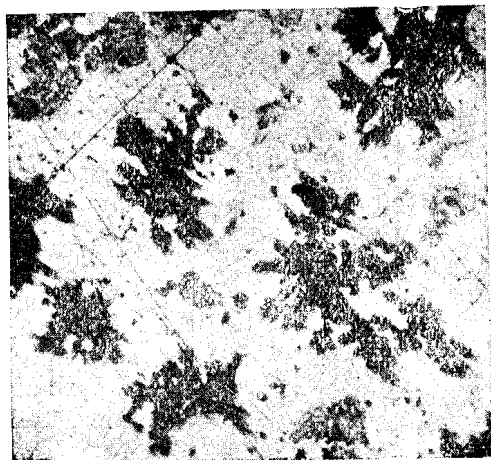


Рис. 26.

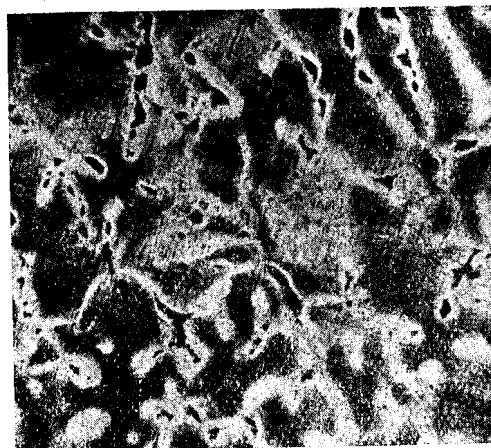


Рис. 27.

Сталь 5140—о (рис. 15). Зерна перлита, окруженные сеткой феррита. Перлит сорбитообразный.

Сталь 5140—н (рис. 16). Зерна перлита, окруженные сеткой феррита. Зерна перлита измельчены. Встречаются в большом количестве вытянутые шлаковые включения.

Сталь 5145—п (рис. 17). Перлитные зерна, окруженные тонкой, не везде одинаковой по толщине сеткой феррита. Перлит сорбитообразный, местами тонкопластинчатый.

Сталь 3120—н (рис. 18). Зерна феррита и отдельные островки перлита. Распределение перлита и феррита по сечению шлифа не одинаково. Заметны следы прокатки.

Сталь 3140—п (рис. 19). Мелкие перлитные зерна, окруженные ферритной сеткой. Местами сохраняется строчечная структура. Перлит мелкопластинчатый.

Сталь 3340—о (рис. 20). Мелкие зерна сорбитообразного перлита, окруженные неявно выраженной сеткой феррита.

Сталь 3340—у (рис. 21). Мелкодисперсный сорбит.

Чугун № 1 (рис. 22). Структура перлитно-ферритовая с включением графита в виде вытянутых жгутиков и отдельных островков фосфористой эвтектики.

Чугун № 2 (рис. 23). Перлитный чугун. Основное поле представляет собой мелкопластинчатый перлит с включениями графита в виде неравномерных по длине вытянутых жгутиков.

Чугун № 3 (рис. 24). Легированный (хромоникелевый) чугун. Основное поле состоит из тонкопластинчатого перлита, с включениями графита в виде изогнутых неравномерных по толщине жгутиков. Местами графит встречается в виде небольших глобулей. Распределение графита по сечению шлифа равномерное.

Чугун № 4 (рис. 25) Легированный (хромоникелевый) чугун. Основное поле состоит из тонкопластинчатого перлита, с включениями графита в виде изогнутых неравномерных по толщине жгутиков. Местами включения графита встречаются в виде глобулей.

Чугун № 5 (рис. 26) Ковкий чугун. Основное поле—чистый феррит с включениями графита в виде глобулей с изъеденным очертанием. Местами встречаются отдельные островки тонкопластинчатого перлита.

Бронза (рис. 27). Структура—дендритное строение расплавленного твердого раствора ОС.

Все исследованные микрошлифы были взяты из металла вдоль направления прокатки. Предварительные исследования показали, что разницы между структурами вдоль и поперек прокатки существенной нет. Поэтому, для однообразия и сравнения всех исследуемых сталей микрошлифы исследовались вдоль направления прокатки.

Травление стальных и чугуновых шлифов производилось 2% раствором HNO_3 в этиловом спирте. Бронза травилась составом: 20 см³ HCl ,—10 грамм хлорного железа, разведенных в 60 см³ этилового спирта.

Микроисследования проводились с помощью настольного металлмикроскопа *Reichert* при увеличениях 100, 200, 300, 500, 750 и 1000. Микрофотографии снимались на большом металлмикроскопе *Reichert* и частично на металлмикроскопе *Zeiss*. Увеличения при съемке микрошлифов взяты следующие:

Стали 3340—о и 3340—у увеличение 320

Остальные стали—120

Чугуны и бронза—60.

Микроисследования показали, что структуры металла после термической обработки (отжиг, нормализация, улучшение) соответствуют стандартным микроструктурам после соответствующей обработки.

Металлографические исследования производил инженер В. Строкопытов.

Методика работы.

А. Цилиндрический фрезер.

Нами были выведены теоретически ¹⁾ и затем подтверждены широко проведенным экспериментом ²⁾ уравнения, характеризующие зависимости окружной силы и мощности при работе цилиндрического фрезера от факторов процесса резания. Эти уравнения следующие:

Удельное давление резания

$$K_s = \lambda S_e^k \quad 1$$

Окружная сила на фрезере при данном мгновенном положении его зубьев под стружкой:

$$\dot{P} = D \lambda S_z^{\kappa+1} \operatorname{tg} \beta \frac{2^{\kappa+1}}{k+2} \sum \left\{ \sin^{\kappa+2} \left(\frac{\psi_2}{2} \right) - \sin^{\kappa+2} \left(\frac{\psi_1}{2} \right) \right\} \quad 2$$

Средняя мощность при работе цилиндрического фрезера

$$N_e = \frac{2^{\kappa+1}}{\kappa+2} \frac{\lambda n^{-\kappa}}{1000 \cdot 4500} \cdot b \cdot s \cdot t^{\frac{\kappa+2}{2}} \cdot z^{-\kappa} \cdot D^{\frac{\kappa}{2}} \quad 3$$

Эти зависимости были подтверждены нами экспериментально как при помощи опытов на фрезерном станке, так и опытами на специальном маятниковом динамометре при работе по разнообразным металлам (стали, чугуны, алюминий) и потому могут считаться вполне достоверными.

Здесь:

- λ — постоянная, характеризующая обрабатываемый материал и профиль зуба фрезера (наличие или отсутствие переднего угла).
- S_e — Толщина стружки в данный момент в данной точке зуба фрезера.
- k — Постоянная, зависящая от обрабатываемого материала и остроты зуба фрезера. Величина отрицательная и дробная.
- D — диаметр фрезера в мм.
- S_z — подача на один зуб в мм.
- β — угол подъема спирали зуба.
- ψ_1, ψ_2 — концевые углы, характеризующие данное мгновенное положение зуба под стружкой.
- n — число оборотов фрезера в минуту.
- b — ширина фрезерования в мм.
- s — подача в миллиметрах в минуту.
- t — глубина фрезерования (толщина снимаемого слоя).
- z — число зубцов фрезера.

По уравнению 3 для определения расхода мощности при фрезеровании того или иного обрабатываемого материала достаточно знать λ и k , определение которых и должно быть проведено экспериментальным путем для различных обрабатываемых материалов.

Наипростейшая методика эксперимента, требующая минимального количества экспериментов и не уступающая по точности любой иной, была нами применена в наших прошлых экспериментальных работах. Она станет ясна из следующих выкладок.

Из уравнения 3 можно получить выражение затраты работы одного зуба фрезера при снятии одной стружки за 1 оборот:

$$A_z = \frac{1000 \cdot 4500 N_e}{zn} \text{ кгмм.}$$

Подставляя вместо N_e правую часть уравнения 3, получим

$$A_z = \frac{2^{\kappa+1}}{\kappa+2} \lambda \cdot b \cdot S_z^{\kappa+1} \cdot t^{\frac{\kappa+2}{2}} \cdot D^{-\frac{\kappa}{2}}$$

Работа A_z затрачивается на сьем объема стружки

$$W = b \cdot t \cdot S_z \text{ мм}^3$$

Разделив A_z на W , получим удельную работу A_w , затрачиваемую на сьем 1 мм³ стружки.

$$A_w = \frac{A_z}{b \cdot t \cdot S_z} = \frac{2^{\kappa+1}}{\kappa+2} \lambda \left\{ S_z \sqrt{\frac{t}{D}} \right\}^{\kappa} \text{ кгмм/мм}^3$$

Здесь $\sqrt{\frac{t}{D}} = \sin \frac{\varphi}{2}$, где φ — угол контакта, на котором производится снятие стружки зубом фрезера.

Отсюда

$$S_z \sqrt{\frac{t}{D}} = S_z \cdot \sin \frac{\varphi}{2} = S_m$$

S_m — ничто иное, как толщина стружки по середине угла контакта или иначе „срединная толщина стружки“. Окончательно имеем

$$A_w = \frac{2^{\kappa+1}}{\kappa+2} \cdot S_m^{\kappa} \quad 4$$

Уравнение 4 показывает, что, с какими бы значениями D, z, n, b, t, s, s_z не происходила работа фрезерования, удельная работа при постоянном обрабатываемом материале и профиле зуба ($\kappa, \kappa = \text{const}$) зависит лишь от срединной толщины стружки. Таким образом, если результаты измерения полезной мощности N_e , затрачиваемой при работе с различными диаметрами, числами зубцов, числом оборотов, шириной фрезерования, глубиной фрезерования, подачей, пересчитать на удельную работу A_w и результаты всех этих экспериментов уложить в график с логарифмическими координатами S_m (абсцисса) и A_w (ордината), то на этом графике мы должны получить для всех опытов по данному обрабатываемому материалу лишь одну прямую. Наклон этой прямой к оси абсцисс (S_m) даст $\text{tg } \alpha = \kappa$, величина A_w при $S_m = 1$ даст $\frac{2^{\kappa+1}}{\kappa+2}$, т. е. без труда можно определить величины κ и λ , а это все, что мы должны получить для уравнения мощности 3.

Все только что изложенное было полностью подтверждено нашими прошлыми экспериментальными работами.

Таким образом для определения зависимости полезной мощности от факторов резания при фрезеровании было бы достаточно, взяв фрезер с любым диаметром и числом зубцов, провести ряд экспериментов с одной глубиной фрезерования и с рядом подач и отсюда уже можно было бы получить значения κ и λ , необходимые для уравнения 3. Но для большей надежности представленной нами и утвержденной Техотделом Наркоммаша методикой предусматривалось проведение опытов не менее чем с двумя глубинами фрезерования по каждому обрабатываемому материалу.

Для опытов были выбраны глубины

$$t = 1 \text{ мм (чистовая)}$$

$$t = 4 \text{ мм (обдирочная)}$$

Так как $N_e = \frac{Mn}{716200}$, где M крутящий момент в кг мм, то удельная работа может быть выражена следующим образом

$$A_w = \frac{1000 \cdot 4500 N_e}{z \cdot n \cdot b \cdot t \cdot s_z}$$

$$A_w = 6,28 \frac{M}{b \cdot t \cdot s_z \cdot z} \quad 5$$

Таким образом в экспериментах необходимо было для определения A_w измерять величины b, t, s_z, z, M , кроме этого для определения S_m нужно было измерить D . О методе измерения крутящего момента на фрезере нами будет сказано ниже в разделе экспериментальной аппаратуры, остальные же величины измерялись следующим образом:

Диаметр фрезера D измерялся микрометром с точностью до 0,05 мм. Большой точности здесь не потребовалось, т. к., судя по уравнению 3, влияние диаметра на расход мощности очень невелико.

Ширина фрезерования „ b “ измерялась микрометром с точностью до 0,01 мм.

Глубина фрезерования t измерялась индикатором и микрометром-глубиномером с точностью до 0,01 мм.

Подача измерялась индикатором с точностью до 0,005 мм.

В. Торцевой фрезер.

Для работы торцевого фрезера нами были выведены и проверены экспериментом следующие зависимости ³⁾:

Удельное давление резания

$$K_s = \lambda \cdot S_e^\kappa \cdot t^l \quad 6$$

Так как зуб торцевого фрезера работает по принципу несвободного резания и срезает стружку как по ширине, так и по толщине, то на удельное давление влияет кроме толщины стружки S_e еще и ширина ее, которая в данном случае является толщиной снимаемого слоя, глубиной фрезерования t . Величина l характеризует влияние t на K_s (Рис. 28).

Окружная сила на фрезере.

$$P = \lambda \cdot S_z^{\kappa+1} t^{l+1} \Sigma \sin^{\kappa+1} \psi \quad 7$$

Полезная мощность при фрезеровании в случае когда ширина фрезерования равна диаметру ($b = D$)

$$N_e = \frac{2^{-\frac{\kappa}{2}}}{1000 \cdot 4500} \lambda \cdot n \cdot t \cdot s \cdot z \cdot D \quad 8$$

Полезная мощность в том случае, когда $b < D$ и фрезер расположен симметрично относительно фрезеруемой поверхности:

$$N''_e = N_e \left[1 - \left(1 - \frac{b}{D} \right)^{\frac{\kappa+2}{2}} \right] \quad 9$$

Полезная мощность в том случае, когда $b > \frac{D}{2}$ и фрезер, будучи расположен с одной стороны обрабатываемой поверхности (боковое резание), снимает стружку подобно цилиндрическому, начиная с нулевой толщины.

$$N'_e = N_e 2^{\frac{\kappa}{2}} \left(\frac{b}{2} \right)^{\frac{\kappa+2}{2}} \quad 10$$

В выражениях 9 и 10 N_e — мощность для того случая, когда $b = D$, т. е. по уравнению 8. Ширина фрезерования b во всех случаях измеряется в плоскости нормальной к оси фрезера и нормально к направлению подачи (рис. 28). Все эти уравнения также были подтверждены в нашей прошлой работе ³⁾.

В настоящей работе торцевой фрезер работал всегда с шириной фрезерования равной диаметру ($b = D$), так как при этом получалась наиболее спокойная работа фрезера. Для этого случая работа одного зуба

$$A_z = 2^{-\frac{\kappa}{2}} \lambda \cdot S_z^{\kappa+1} t^{l+1} D$$

Удельная работа

$$A_w = \frac{A_z}{t \cdot D \cdot S_z} = 2^{-\frac{\kappa}{2}} \lambda \cdot S_z^\kappa \cdot t^l$$

$$A_w = \lambda \cdot (0,707 S_z)^\kappa \cdot t^l$$

Здесь $0,707 = \sin 45^\circ = \sin \frac{\varphi}{2}$

$$0,707 S_z = S_z \sin \frac{\varphi}{2} = S_m$$

отсюда

$$A_w = \lambda S_m^\kappa \cdot t^l \quad (11)$$

Если уравнение 11 выразить графически в логарифмических координатах $S_m - A_w$, то получим столько прямых, сколько различных глубин фрезерования было взято в опытах (если при этом $l \neq 0$). Наклон этих прямых дает возможность определить значение k . При $S_m = 1$ и $t = 1$ получаем значение λ . Из соотношений A_w при постоянном (любом) значении S_m , но при различных t получаем величину l . Таким образом для определения значений λ , k , l , необходимых для уравнений мощности, достаточно провести по каждому обрабатываемому материалу серию опытов с любым диаметром фрезера, и с любым числом зубцов, при нескольких различных глубинах фрезерования и с рядом подач при каждой глубине фрезерования.

Для надежности выводов методикой было предусмотрено проведение опытов при четырех глубинах фрезерования.

$t = 1 \text{ мм}; 2 \text{ мм}; 4 \text{ мм}$ и 6 мм .

Режущий инструмент.

Из изложенного выше явствует, что для определения характеристик мощности достаточно провести эксперименты лишь с одним размером фрезера. Поэтому было взято по одному фрезеру для цилиндрического и торцевого фрезерования.

Цилиндрический фрезер (рис. 29):

Диаметр $\approx 59 \text{ мм}$.

Число зубцов 8.

Угол подъема спирали к торцу $\beta = 60^\circ$.

Угол наклона спирали к оси 30° .

Передний угол в плоскости торца $\gamma = 10^\circ$.

Задний угол $6-8^\circ$.

Материал фрезера сталь $P\Phi - 1$.

Фрезер во все время работы не снимался с правки и для получения минимальной эксцентricности зубьев на этой же оправке и затачивался.

Эксцентricность зубцов фрезера после заточки проверялась индикатором при закрепленной оправке фрезера в рабочем положении в шпин-



Рис. 29.

деле фрезерного станка. Один из таких замеров, проведенных в трех различных местах фрезера (по его длине), приведен в табл. 4.

Таблица 4

№ зуба	Показания индикатора в сотых миллиметра		
	Сечение 1	Сечение 2	Сечение 3
1	0	0	1
2	1	0	1
3	1	1	1
4	1	1	0
5	2	1	1
6	2	2	1
7	2	2	1
8	1	1	

Таблица показывает, что эксцентricность не превышает 0,02 мм.

Торцевой фрезер (рис. 30).

Диаметр 64 мм.

Число зубцов 10.

Передний угол на лезвии цилиндрической части 8°.

Передний угол на торцевом лезвии 15°.

Задний угол на цилиндрической части 8—10°.

Задний угол на торцевом лезвии 6—8°.

Наклон торцевого лезвия к плоскости торца 1¹/₂—2°.

Радиус закругления при сопряжении торцевого и цилиндрического лезвий 0,5 мм.

Материал фрезера—сталь РФ—1.

Фрезер также затачивался на оправке и результаты измерения эксцентricности зубьев получались качественно такими же, как для цилиндрического фрезера.

Фрезера для опытов применялись только с острым зубом. В переточку фрезера направлялись в тот момент, когда по задней грани образовывалась фаска шириной 0,1 мм. Контрольные опыты показали, что такое затупление не оказывает заметного влияния на расход мощности. Заточка производилась обычно по задней грани и в том лишь случае, когда на передней грани появлялось заметное на глаз выщербление, производилась зачистка передней грани.

После заточки фрезер в течение нескольких проходов прогонялся без регистрации нагрузок. Это было необходимо, чтобы удалить с лезвия полученное при заточке „жало“ и привести его в некоторое стабильное рабочее состояние. В противном случае результаты опытов с только что заточенным фрезером несколько отклонялись от результатов всех остальных опытов.

Измерение углов на фрезерах производилось как угломером, так и методом координат, причем во всех случаях мы получали хорошее совпадение результатов.

Оборудование и экспериментальная аппаратура.

Все опыты проводились на универсально фрезерном станке Тульского завода, имеющем 12 скоростей шпинделя и 12 подач от 20 до 700 мм в минуту. При работе торцевого фрезера болванка крепилась к вспомога-

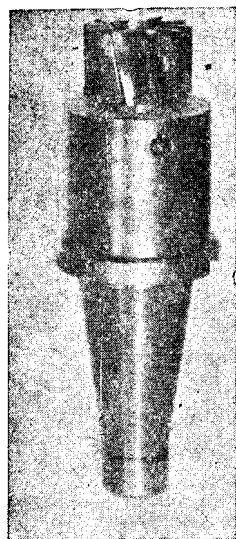


Рис. 30.

тельной болванке таким образом, что обрабатываемая поверхность оказывалась обращенной к шпинделю станка, в котором крепился торцевой фрезер. Во всех случаях работы, после необходимой установки на глубину резания, направляющие вертикальной и поперечной подачи прочно зажимались, чтобы предохранить систему от наличия неизбежных в этих направляющих люфтов и колебаний.

Торцевому фрезеру придавалось такое направление вращения, чтобы обрабатываемая болванка действующими силами резания прижималась к столу, а не отрывалась от него.

Во время опытов необходимо было регистрировать крутящие моменты на фрезере (без вредных сопротивлений). Для этого был использован динамометр конструкции автора, встроенный в коробку скоростей станка. Принцип действия динамометра понятен из рис. 31. На вал, приводящий в движение шпиндель фрезерного станка, посажена на шпонке шестерня 3, которая, вращаясь вместе с валом, через шестерню 4 вращает шестерню

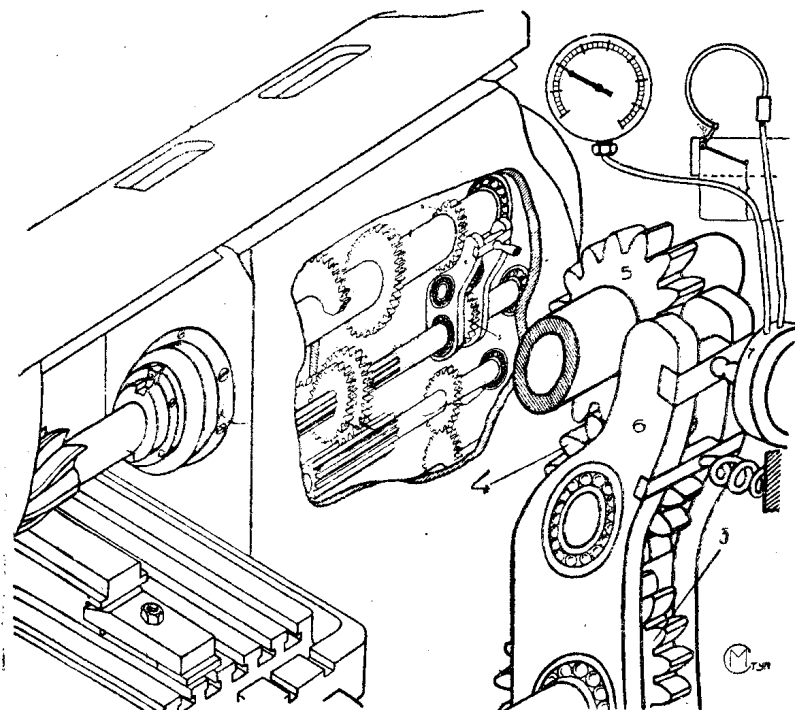


Рис. 31.

5, связанную со шпинделем. Промежуточная шестерня 4 вращается на шарикоподшипниках в двух серьгах 6, которые в свою очередь посажены на шарикоподшипниках на вал, на котором на шпонке сидит шестерня 3. Серьги 6 прочно связаны между собой. При передаче на шпиндель крутящего момента через шестерни 3, 4, 5, окружные силы, возникающие на шестерне 4, стремятся повернуть ее вместе с серьгами 6 по часовой стрелке (если шпиндель вращается также по часовой стрелке). Но серьги опираются через специальный штырь на гидравлическую мессдозу 7, укрепленную на боковой стенке станка. На рис. 32 на правой стенке станка стрелкой показана мессдоза, от которой трубки идут к показывающему и регистрирующему манометрам, укрепленным на стене, слева от станка. Так как жидкость в мессдозе практически несжимаема, то серьги 6 почти не перемещаются. Давление на поршень мессдозы будет тем больше, чем больше крутящий момент на шпинделе. Крутящий момент может быть таким образом зарегистрирован самопишущим манометром на движущейся ленте бумаги.

Специальная пружина предусмотрена для притягивания серег 6 к мессдозе 7, что создает первоначальный натяг и уничтожает люфты. Практически во время работы динамометр регистрирует не только чистый крутящий момент резания, но и вредные сопротивления в подшипниках шпинделя, в подшипниках шестерни 4, в паре шестерен 4—5, а при работе цилиндрического фрезера и во внешнем подшипнике оправки фрезера. Шпиндель станка монтирован на конических роликовых подшипниках, шестерня 4 на шариковых и потери здесь практически незаметны. Потери в паре 4—5 и во внешнем подшипнике оправки учитывались при помощи специ-

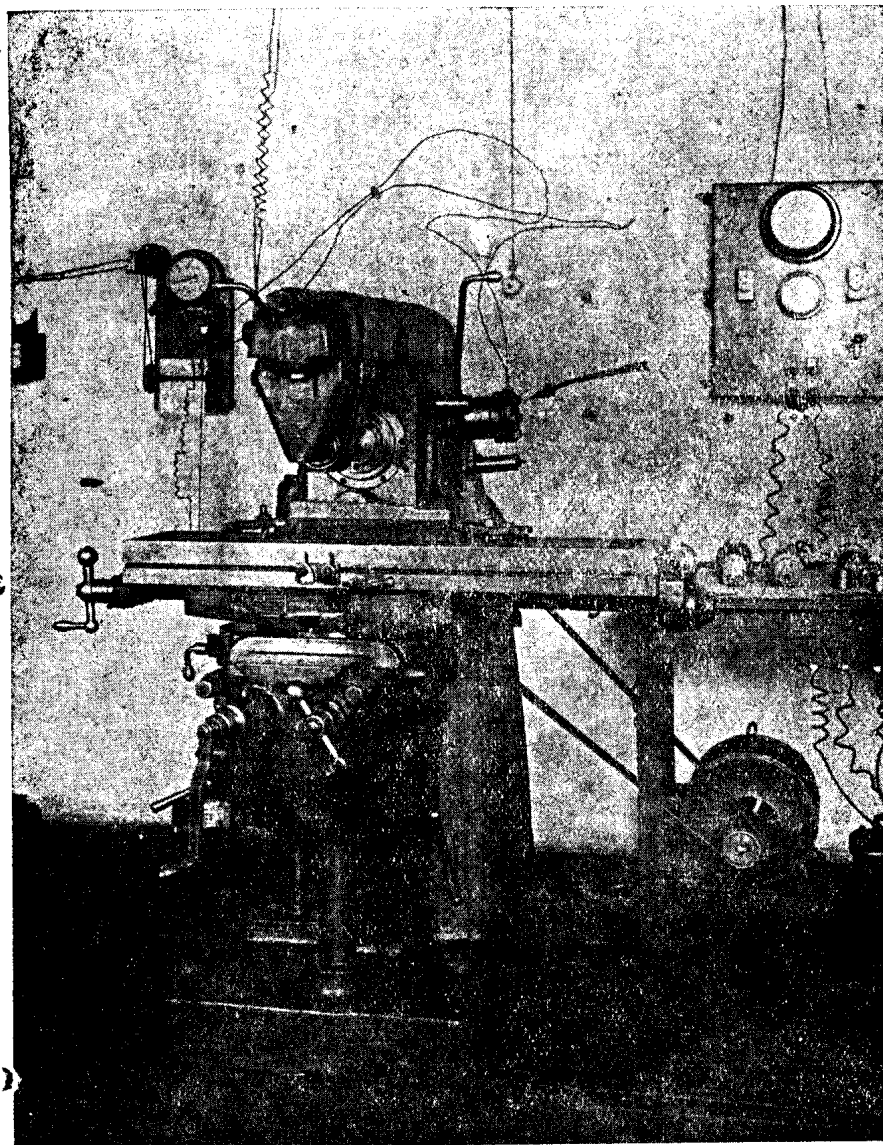


Рис. 32.

альной тарировки и затем исключались из общего крутящего момента зарегистрированного динамометром.

Основная тарировка динамометра производилась тормозом „Прони“. Тарировочный график показан на рис. 33. На рис. 34 показано перемещение поршня мессдозы, замеренное при тарировке. Максимальное перемещение поршня мессдозы составляет всего лишь 0,16 мм, перемещение же шестерни 4 динамометра при этом не превосходит 0,1 мм. Если принять во внимание, что имеется первоначальный натяг, примерно равный 25% от максимальной расчетной для динамометра нагрузки, и что во время работы при точно шлифованных фрезерах нагрузка никогда не колеблется

от максимума до нуля, можно представить себе, насколько стабильной получается вся система в работе и динамометр работает совершенно безукоризненно. Динамометр находится в работе уже более 4 лет и все за это время проведенные десятки тарировок, а также неоднократные контрольные тарировки, проведенные в течение настоящей работы, во всех случаях давали один и тот же тарировочный график.

Для учета добавочных потерь, возникающих под влиянием действующих сил на фрезере, была произведена специальная тарировка отдельно для случая работы цилиндрического фрезера (наличие внешнего подшипника оправки фрезера), результаты которой представлены на рис. 35, и отдельно для случая работы торцевого фрезера (отсутствие внешнего подшипника), результаты представлены на рис. 36. Величины добавочных крутящих моментов, как функции действующих на фрезере сил, очень невелики, но все же мы их вычитали из получаемых при опытах крутящих моментов и получали таким образом чистый момент резания.

Осевые нагрузки на фрезере, как показало специально проведенное испытание, совершенно не сказывались на показаниях динамометра.

Динамометр не мог в силу своей „инерционности“ абсолютно точно регистрировать изменения крутящего момента, происходящие в очень короткие промежутки времени, поэтому

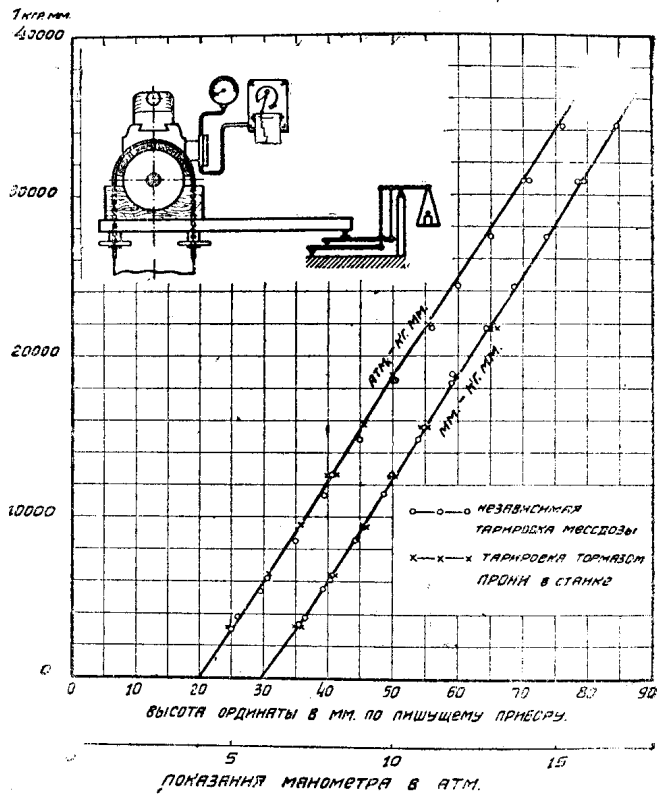


Рис. 33.

при работе цилиндрическим фрезером была взята такая ширина фрезерования b , которая была связана с диаметром фрезера D , углом подъема спирали β , с шагом спирали зуба фрезера H и числом зубцов Z зависимостью

$$b = \frac{H}{Z} = \frac{\pi D \operatorname{tg} \beta}{Z}$$

При этом, как известно, суммарное сечение на всех одновременно работающих зубьях постоянно как по величине, так и по форме, суммарная окружная сила и крутящий момент также являются величиной постоянной при заданном режиме и если и

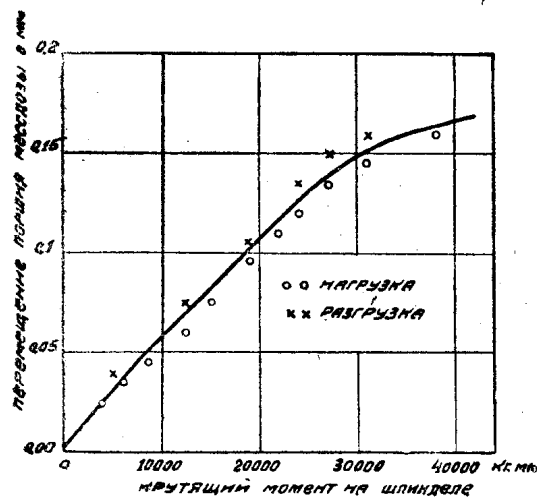


Рис. 34.

имеют некоторые колебания в силу неизбежного биения фрезера, то эти колебания происходят один раз за один оборот фрезера и могут быть точно зарегистрированы динамометром.

Скорость ленты бумаги, на которой производилась запись диаграммы крутящего момента пишущим манометром, была такова, что один оборот фрезера занимал на диаграмме 40 мм и все колебания нагрузки получали четкое отображение.

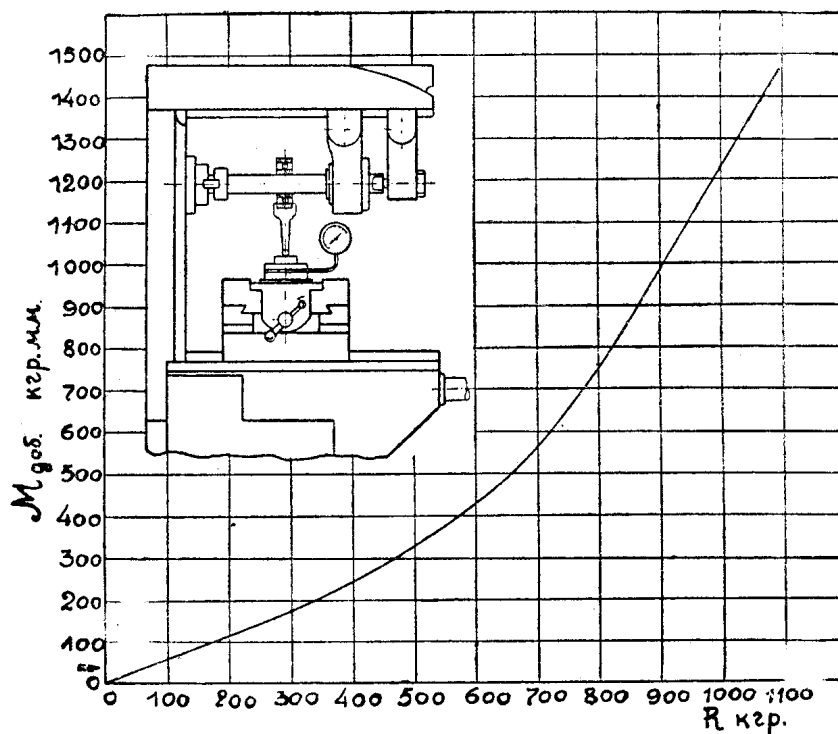


Рис. 35.

Все без исключения диаграммы планиметрировались, причем так, что планиметром захватывалась часть графика, соответствующая обязательно целому числу оборотов фрезера (2—3), по площади находилась средняя высота, а отсюда по тарировочному графику величина крутящего момента.

В процессе опытов выяснилось, что при работе с торцевым фрезером при глубине фрезерования 6 мм, по стали, при существующих подачах у

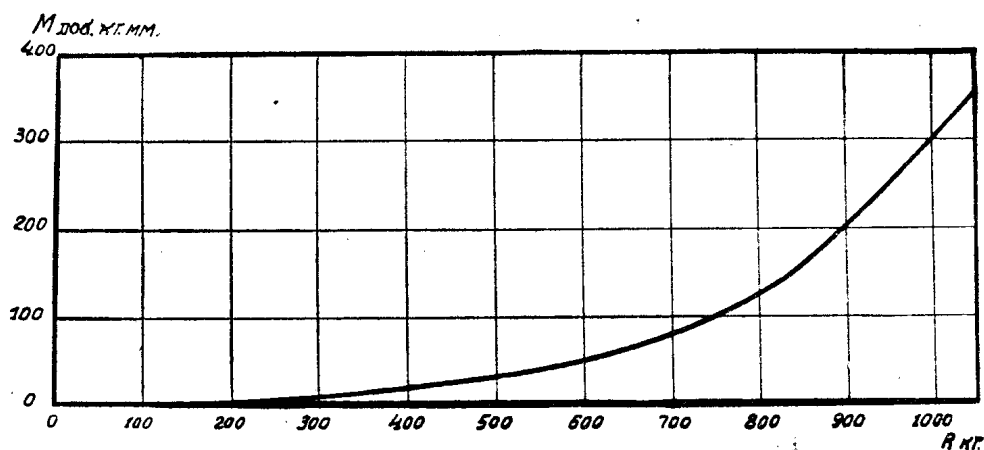


Рис. 36.

станка, представляется возможным в пределах допустимой динамометром нагрузки использовать лишь 3—4 наименьших подачи и получить т. о. при этой глубине фрезерования лишь 3—4 экспериментальных точки. Часть опытов так и была проведена. Затем в механизм подачи станка была встроена передача, уменьшающая величины подач в 60 раз. Благо-

даря этому станок имел уже не 12, а 24 подачи и представлялось возможным иметь большее количество экспериментальных точек при любой глубине фрезерования.

Все опыты были проведены при числе оборотов шпинделя 34 об/мин. При этом использовались следующие подачи за 1 оборот фрезера и на один зуб фрезера (табл. 5).

Таблица 5

№	Подача в мм/об S_n	Подача на 1 зуб (S_z) мм	
		Цилиндр. фрезер $Z = 8$	Торцевой фрезер $Z = 10$
1	0,073	0,0094	0,0073
2	0,1	0,0125	0,01
3	0,134	0,0167	0,0134
4	0,2	0,025	0,02
5	0,272	0,034	0,0272
6	0,37	0,0463	0,037
7	0,585	0,0732	0,0585
8	0,805	0,1006	0,0805
9	1,10	0,137	0,11
10	1,59	0,1987	0,159
11	2,21	0,276	0,221
12	3,0	0,375	0,3
13	4,46	0,557	0,446
14	6,21	0,776	0,621
15	8,4	1,05	0,84
16	12,1	1,51	1,21
17	16,85	2,106	1,685

Из таблицы видно, что использованные подачи выходят далеко за пределы с одной стороны самых мелких чистовых, с другой самых крупных обдирочных. Все опыты велись без охлаждения—смазки. Влияние смазки на расход мощности нами установлено в другой работе и в ближайшее время будет опубликовано.

Опыты с цилиндрическим фрезером.

Прежде чем приступить к основным опытам, имеющим целью определение значений k и λ для различных металлов, нами была проведена серия опытов по определению влияния скорости резания на крутящий момент, при всех прочих постоянных условиях ($t, b, D, Z, S_z = \text{const.}$) Это, хотя и не было предусмотрено программой исследования, являлось крайне необходимым, так как по данным *Stoewer'a* ⁴⁾ имеется существенное влияние скорости на крутящий момент при фрезеровании стали средней твердости.

По *Stoewer*'у это влияние таково, что при увеличении скорости резания с 5 до 30 метров в минуту, крутящий момент, при постоянной подаче за 1 оборот, падает на 10%. Все без исключения другие исследователи процесса фрезерования не уделяли внимания этой зависимости, видимо, считая, что удельное давление при фрезеровании не зависит от скорости резания. Данные *Stoewer*'а со своей стороны требовали проверки, т. к. при его исследованиях для регистрации крутящего момента не имелось никакого специального устройства и крутящий момент определялся по расходуемой мощности и коэффициенту полезного действия станка методом торможения Bahleske, что не может быть признано правильным, ввиду переменности потерь в отдельных звеньях станка при изменении нагрузки и скорости. Мы же провели этот опыт, пользуясь нашим динамометром, который для этой цели был протарирован при различных скоростях вращения шпинделя. Рис. 37, построенный по результатам наших опытов, показывает на абсолютное отсутствие влияния скорости резания на крутящий момент.

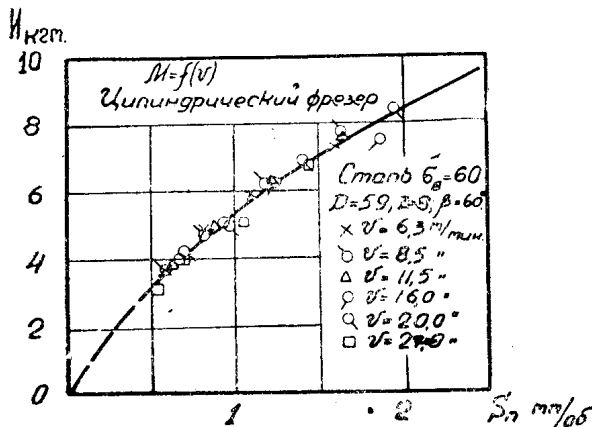


Рис. 37.

Опыты были проведены при постоянной глубине фрезерования, равной 2,4 мм и ширине 40 мм. Скорость выше 27 м/мин мы не имели возможности осуществить через наш динамометр.

На основании рис. 37 можно сделать заключение о возможности проведения опытов при любой из скоростей до 30 м/мин.

С целью получения более спокойной работы, лучшего сохранения лезвия в работе и меньшего расхода обрабатываемого материала,

мы работали в дальнейшем с числом оборотов 34 в минуту, что соответствовало для цилиндрического фрезера скорости резания 5,3 м/мин.

В дальнейшем мы приводим в таблицах 6—9 величины крутящих моментов, полученные при опытах по испытуемым материалам. Величины крутящих моментов из этих таблиц нами были пересчитаны на удельную работу A_w и построены графики в логарифмических координатах $S_m - A_w$ (Рис. 38—63). На графиках срединная толщина стружки отложена в микронах.

На всех без исключения графиках мы видим, насколько удовлетворительные получились результаты. Не вызывает никакого сомнения прямолинейность зависимости $A_w = f(S_m)$ в логарифмических координатах. В некоторых случаях (рис. 50, 51, 62) при самых тонких стружках (в левой части графиков) экспериментальные точки отходят книзу от проведенной прямой. Это находит объяснение в следующем обстоятельстве. Указанное отклонение точек наблюдается на рис. 50, 51, 52 при срединной толщине стружки меньше 5—7 микрон. При столь тонких стружках, даже при очень тщательной заточке зубцов фрезера, стружка снимается не каждым очередным зубом фрезера, а некоторые зубцы, отличающиеся по высоте от соседних, либо по всей длине режущей кромки, либо по части ее не снимают стружки, оставляя на следующий зуб более толстую стружку. Более толстая стружка требует меньшей удельной работы, что и отображается снижением точки на графике.

Некоторые серии опытов нами повторялись при совершенно одинаковых условиях, причем это повторение производилось спустя некоторое значительное время. Такие опыты проведены по стали 1040—у и 5140—н.

Таблица 6

Крутящие моменты в килограммомиллиметрах при работе цилиндрического фрезера с числом зуб-
цов $Z=8$ и углом подъема спирали $\beta=60^\circ$

Обрабатыв. материал	Сталь 1010—п		Сталь 1020—н		Сталь 1020—п		Сталь 1035—п		Сталь 1035—н		Сталь 1040—п		Сталь 1040—о		Сталь 1040—н			
	1.03	4.14	1.04	4.0	1.0	4.1	1.02	1.8	4.0	1.05	4.2	1.02	2.0	4.15	1.0	4.1	1.0	4.1
D мм	58.5	39	58.8	40.3	58.8	40.3	58.5	39	58.5	40.3	58.8	40.3	58.8	40.3	58.8	40.3	58.8	40.3
b мм																		
t мм																		
Sz подача на 1 зуб																		
0.0091	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
0.0125	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
0.01674	—	2896	—	—	—	—	980	2203	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
0.0250	—	3485	—	—	—	—	1276	2787	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
0.0340	—	4368	—	—	—	—	1620	2994	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
0.0463	—	5497	—	—	—	—	2110	3554	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
0.0732	2012	7286	2445	7838	2395	7562	1915	5565	2061	6325	1973	3337	5879	1915	6575	1944	6623	
0.1006	2676	9240	3043	9261	2894	9019	2425	6830	2615	8165	2208	4352	7190	2641	8311	2115	7895	
0.1374	3313	10921	3828	11263	3857	11069	3063	8580	3410	9630	3092	5506	9000	3140	10240	3170	9898	
0.1987	4515	13766	5005	14323	4466	13723	3925	6085	4220	12552	3907	7064	11574	4344	13402	4319	12528	
0.2765	5423	17075	6035	17654	5830	16381	4860	7308	5638	16747	4908	8960	14854	5496	16235	5488	15145	
0.3750	6477	19513	7455	21280	7073	19528	5913	9532	6775	19385	6300	10970	18540	7004	20525	6075	19233	
0.5570	8213	24917	9390	30250	8854	25581	7895	12829	9115	26655	8431	14660	25645	9224	27595	8995	26276	
0.7760	9948	31160	11244	—	10922	29693	9971	15915	11240	31525	10776	18497	30202	11360	—	10980	—	
1.0500	12285	—	13461	—	12917	—	12043	—	13862	—	12965	23007	—	13669	—	13645	—	
1.5120	14864	—	16593	—	16255	—	16835	—	17965	—	16641	—	—	17108	—	17365	—	
2.1060	—	—	20335	—	19193	—	—	—	22330	—	—	—	—	21101	—	21795	—	

Крутящие моменты в килограммомиллиметрах при работе цилиндрического фрезера с числом зуб-
цов $Z=8$ и углом подъема спирали $\beta=60^\circ$

Обр. багив. материал	Сталь 1040—у		Сталь 1050—о		Сталь 3120—н		Сталь 3140—п		Сталь 3340—о		Сталь 3340—у		Сталь 5120—п		Сталь 5120—н					
	1.0	1.04	3.85	1.0	3.0	1.05	4.25	1.12	4.07	1.05	4.0	1.1	4.1	1.0	4.0	1.02	4.0			
Д м м	58.0		59.7		58.5		58.0		58.0		58.0		58.0		58.0					
б м м	40.3		39.7		40.3		39.7		39.75		39.9		40.3		40.3					
т м м	1.0		3.0		1.05		4.25		1.12		4.07		1.1		4.1		1.02		4.0	
S_z подача на 1 зуб	1.0		3.0		1.05		4.25		1.12		4.07		1.1		4.1		1.02		4.0	
0.0091	—	—	—	—	—	—	—	—	1423	—	1375	—	1225	—	—	—	—	—	—	—
0.0125	—	—	—	—	—	—	—	—	1765	—	1815	—	1670	—	—	—	—	—	—	—
0.01674	—	—	—	—	—	—	—	—	2160	—	2260	—	2305	—	—	—	—	—	—	—
0.0250	—	—	—	—	—	3690	—	—	2748	—	2945	—	3140	—	—	—	—	—	—	—
0.0340	—	—	—	—	—	4770	—	—	3580	—	3975	—	3875	—	—	—	—	—	—	—
0.0463	—	—	—	—	—	5888	—	—	4023	—	4820	—	5005	—	—	—	—	—	—	—
0.0732	2258	2356	6281	1775	4953	7944	2420	2208	6183	2500	6920	2355	6870	1964	—	2223	7162	—	—	—
0.1006	2879	2896	8335	2173	6223	9948	3215	2748	7210	2845	8630	2995	8725	2876	8150	3249	9012	—	—	—
0.1374	3436	3475	10863	2845	7495	12065	4025	2940	7800	3730	10875	3780	10970	3524	10298	3828	10776	—	—	—
0.1987	4858	4859	13014	3726	9985	15436	5203	4220	11555	5155	14320	4955	14420	4466	13606	4948	13848	—	—	—
0.2765	5938	6173	16544	4610	12145	19218	5638	5055	14275	6330	17945	6820	18280	5627	16545	6207	17076	—	—	—
0.3750	7455	7494	20421	5785	15032	23246	7950	6428	18149	8215	22450	8335	23240	7171	19955	7455	20790	—	—	—
0.5570	9679	9567	27825	8247	20475	29970	10020	9118	24800	10580	28875	10260	32225	9031	26003	9390	26977	—	—	—
0.7760	11672	12158	—	10910	26290	—	12065	11215	—	12965	—	14225	—	10873	—	11920	—	—	—	—
1.0500	14119	14767	—	13803	—	—	14468	13935	—	15725	—	17220	—	12878	—	13781	—	—	—	—
1.5120	187.8	18637	—	—	—	—	17967	18620	—	20381	—	21800	—	16400	—	17663	—	—	—	—
2.1060	—	22699	—	—	—	—	21865	23795	—	—	—	—	—	20430	—	20324	—	—	—	—

Крутящие моменты в килограмм-миллиметрах при работе цилиндрического фрезера с числом зубцов $Z=8$ и углом подъема спирали $\beta=60^\circ$

Обрабатываемый материал	Сталь 5140-п	Сталь 5140-о	Сталь 5140-н		Сталь 5140-н	Сталь 5145-п	Чугун № 1	Чугун № 2
	58.8	58.8	58.4	58.8	58.4	58.4	58.5	58.0
<i>Д.м.м.</i>	40.3	40.3	39	40.3	39	39.75	39	40.2
<i>б.м.м.</i>	40.3	40.3	39	40.3	39	39.75	39	40.2
<i>t.м.м.</i>	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0
S_z подача на 1 зуб	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0
0.0091	1963	1816	1765	1178	4375	1925	835	1665
0.0125	2464	2430	2455	—	5693	2223	1130	2110
0.01674	—	—	—	2060	—	—	—	—
0.0250	—	—	—	2600	—	—	—	—
0.0340	—	—	—	3240	—	—	—	—
0.0463	—	—	—	3875	—	—	—	—
0.0732	9825	2896	2745	8630	6965	2552	1464	2455
0.1006	8327	2430	2455	6770	5693	2223	1130	2110
0.1374	9825	2896	2745	8630	6965	2552	1464	2455
0.1987	11808	3927	3827	11165	9360	3435	1895	3140
0.2765	14698	5300	5200	14225	11555	4427	2208	3975
0.3750	18578	6281	5985	17465	14515	5815	2750	4710
0.5570	25682	8825	8090	24780	—	7828	2994	6230
0.7760	29875	10912	10140	32965	25625	10182	3750	7845
1.0500	—	13440	13015	—	—	12949	4415	9945
1.5120	—	17141	16980	—	—	16785	6085	13160
2.1060	—	21935	—	—	—	21702	—	—

Таблица 9

Крутящие моменты в килограммомиллиметрах при работе цилиндрического фрезера с числом зубцов $Z=8$ и углом под'ема спирали $\beta=60^\circ$

Обрабатываемый материал	Чугун № 3		Чугун № 4		Чугун № 5		Бронза				
	58.0		58.0		58.0		58.0				
Дмм	40		40.2		40.2		40.3				
б мм	1.33		4.0		1.0		4.0		1.0	2.45	6.15
тмм	1.33		4.0		1.0		4.0		1.0	2.45	6.15
Sz подача на 1 зуб	1.33		4.0		1.0		4.0		1.0	2.45	6.15
0.0091	—	1080	—	835	—	—	—	—	—	—	
0.0125	—	1225	—	1130	—	1130	—	—	—	—	
0.01574	—	1470	—	1325	—	1325	—	—	—	—	
0.0250	—	2060	—	1865	—	1865	—	—	—	—	
0.0340	—	2505	—	2060	—	2305	—	—	—	—	
0.0463	—	3040	—	2600	—	2945	—	—	—	—	
0.0732	1470	3975	1325	3090	1425	4220	932	1816	4025	—	
0.1006	1960	4710	1375	4170	1815	5155	1227	2160	5025	—	
0.1374	2160	5500	1375	5005	2110	5985	1423	2749	5624	—	
0.1987	2845	7015	1865	6575	2845	7845	1758	3338	7162	—	
0.2765	4070	8480	2355	8725	3335	9410	1855	3877	8726	—	
0.3750	4910	10435	2945	9165	3825	11700	2181	4956	10434	—	
0.5570	6330	15245	3675	12720	5055	15485	3219	6525	13790	—	
0.7760	7895	19335	4910	15870	6280	20195	3769	7788	16632	—	
1.0500	9410	23655	6185	19770	8285	25400	5025	9752	20620	—	
1.5120	12770	—	8335	25810	10630	—	6379	12820	—	—	
2.1060	—	—	10580	—	—	—	8238	—	—	—	

Таблица 10

Фрезер цилиндрический. Угол поднутрения 10°

№	Обрабатываемый материал	λ	К
1	Сталь 1010—П	116	—0,37
2	" 1020—П	118	—0,37
3	" 1020—Н	123	—0,365
4	" 1035—П	131	—0,3
5	" 1035—Н	136	—0,29
6	" 1040—П	131	—0,29
7	" 1040—О	138	—0,31
8	" 1040—Н	138	—0,3
9	" 1040—У	151	—0,3
10	" 1050—О	154	—0,26
11	" 5120—П	128	—0,34
12	" 5120—Н	128	—0,36
13	" 5140—П	138	—0,295
14	" 5140—О	142	—0,285
15	" 5140—Н	146	—0,26
16	" 5145—П	162	—0,28
17	" 3120—Н	139	—0,34
18	" 3140—П	144	—0,28
19	" 3340—О	176	—0,26
20	" 3340—У	188	—0,25
21	Чугун № 1	46,5	—0,38
22	" № 2 перлитный	95	—0,33
23	" № 3 легирован.	79	—0,33
24	" № 4 легирован.	62	—0,35
25	" № 5 ковкий	81	—0,33
26	Бронза	42	—0,4

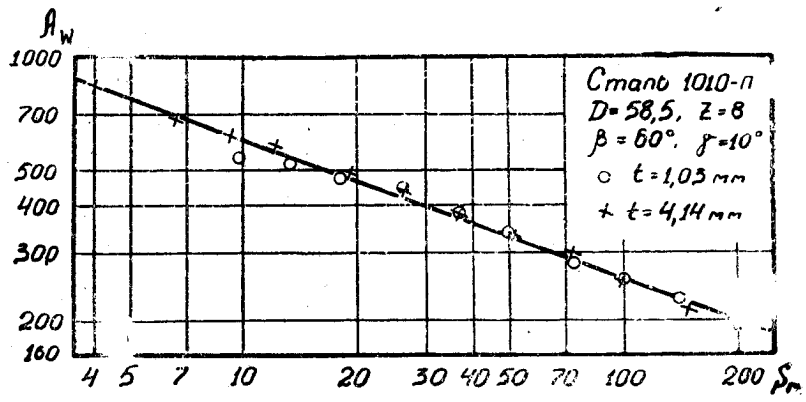


Рис. 38.

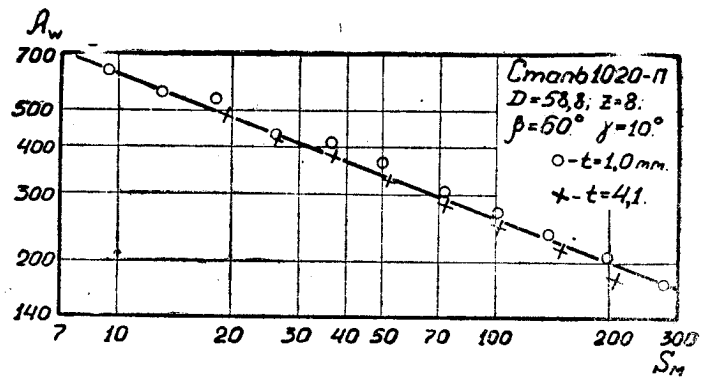


Рис. 39.

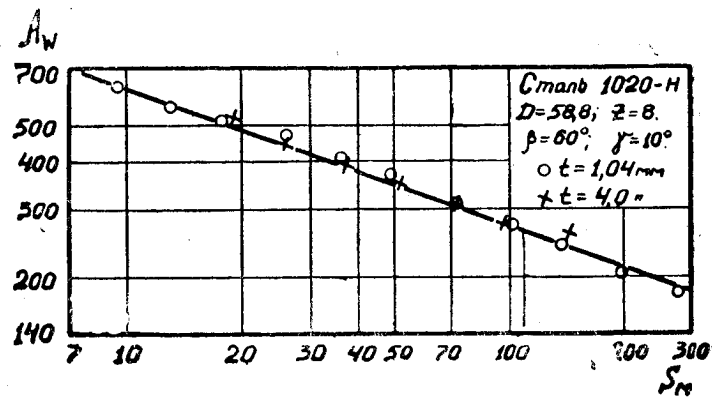


Рис. 40.

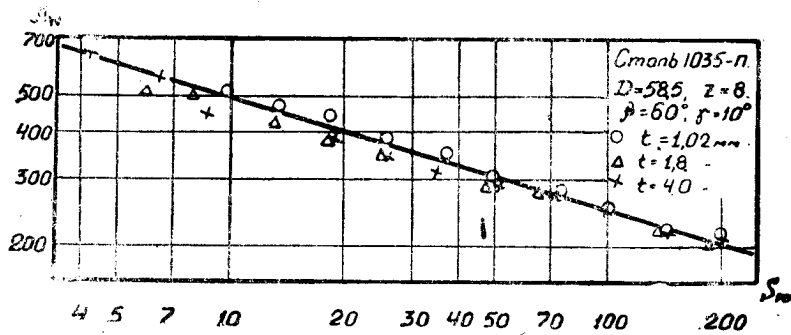


Рис. 41.

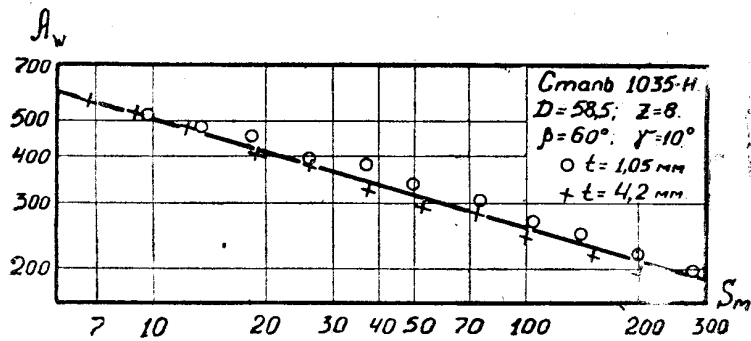


Рис. 42.

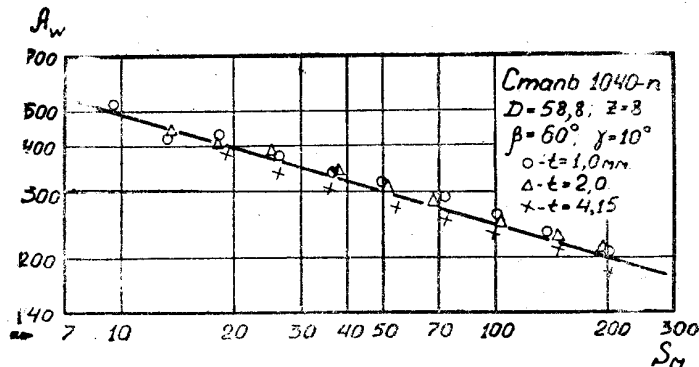


Рис. 43.

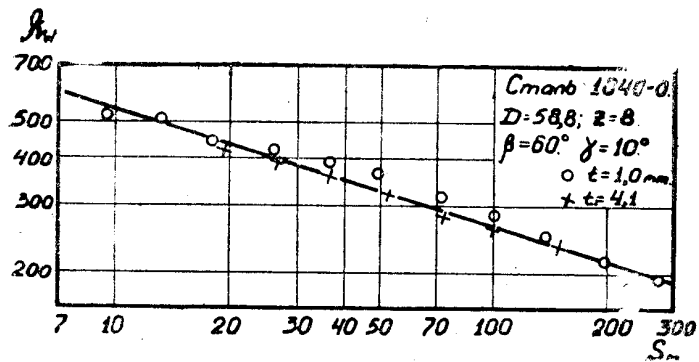


Рис. 44.

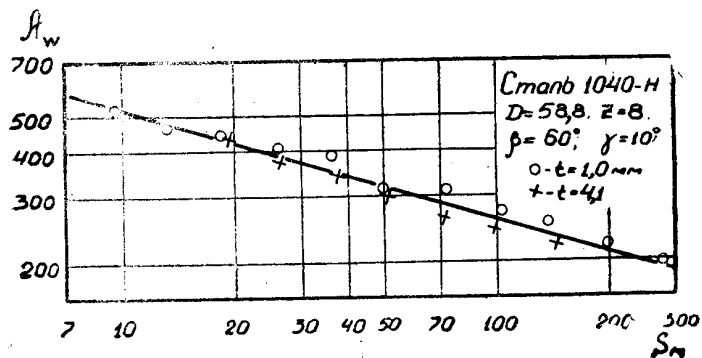


Рис. 45.

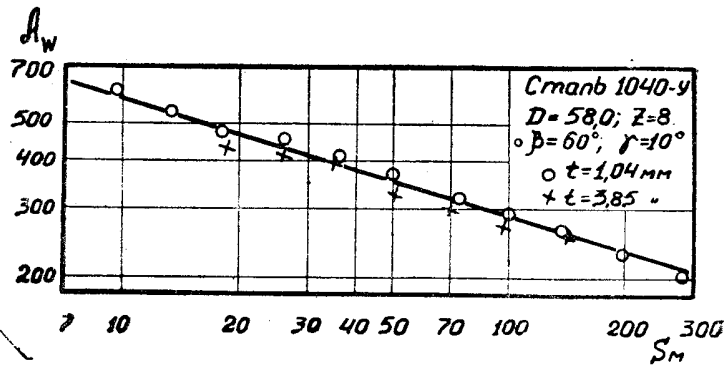


Рис. 46.

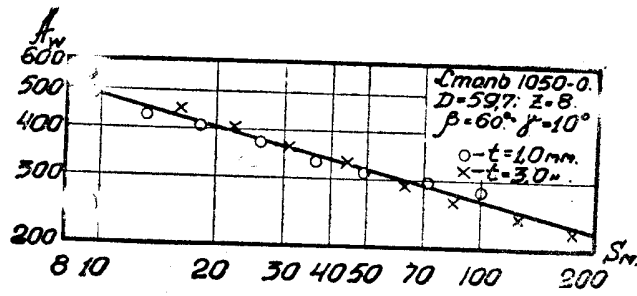


Рис. 47.

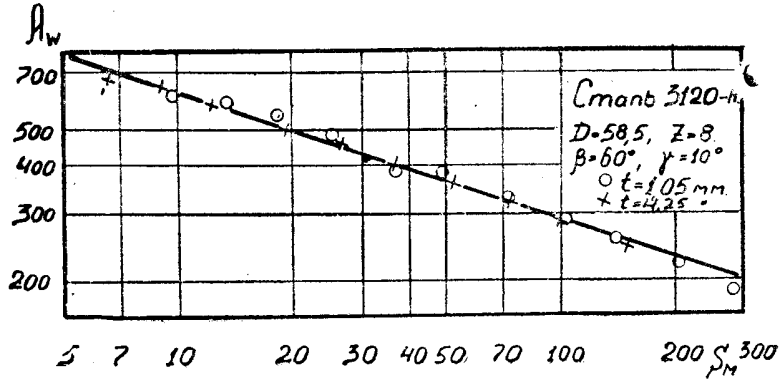


Рис. 48.

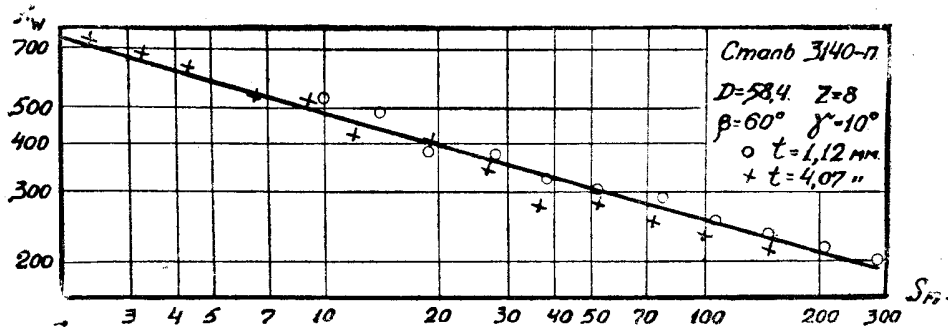


Рис. 49.

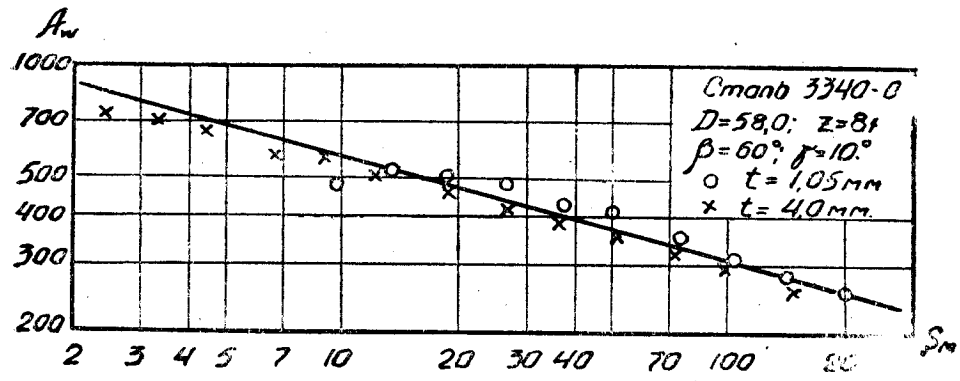


Рис. 50.

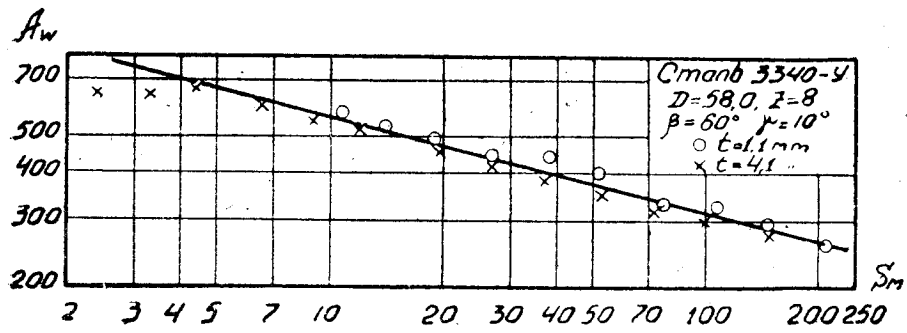


Рис. 51.

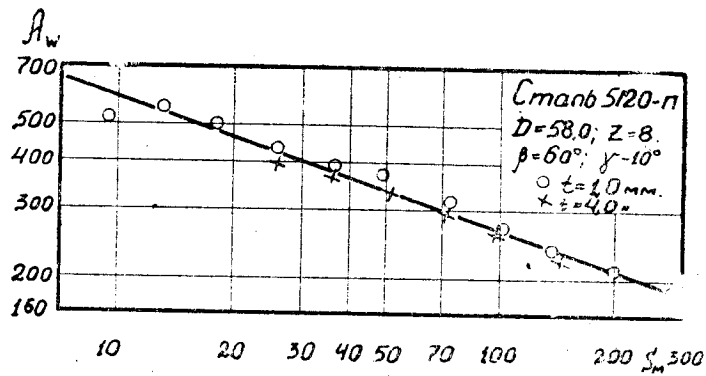


Рис. 52.

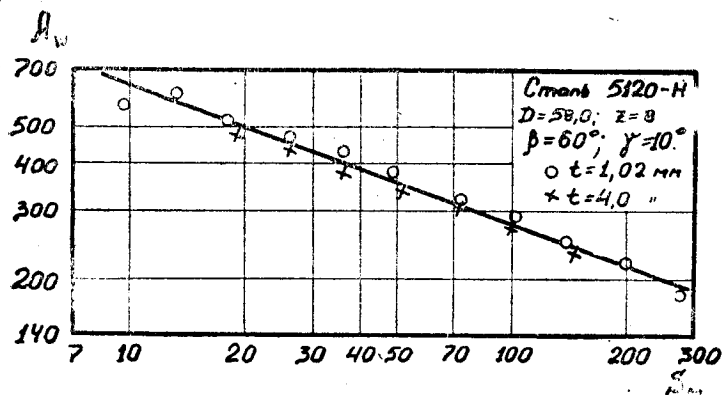


Рис. 53.

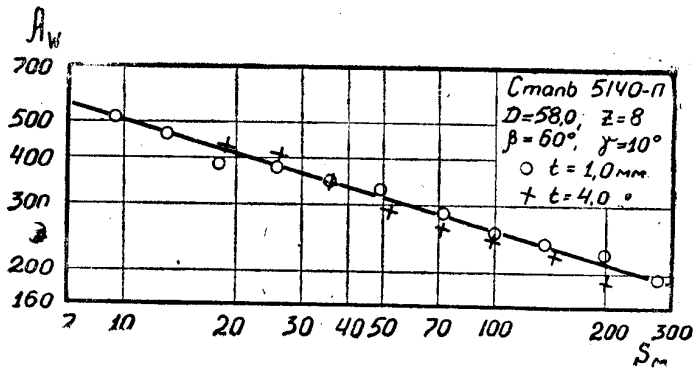


Рис. 54.

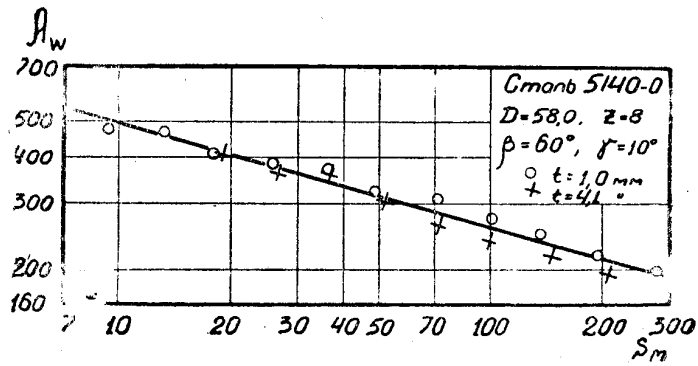


Рис. 55.

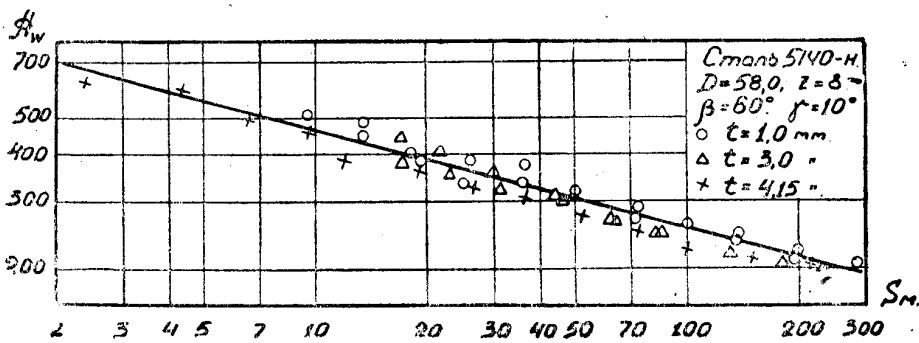


Рис. 56.

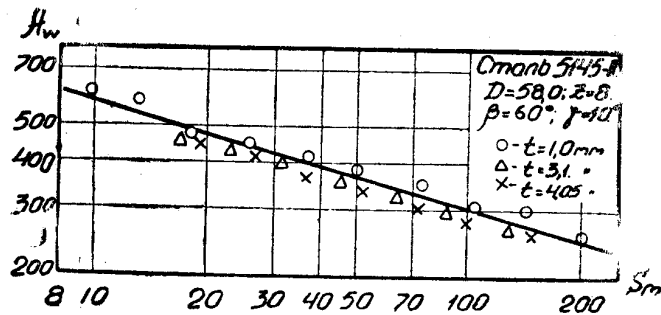


Рис. 57.

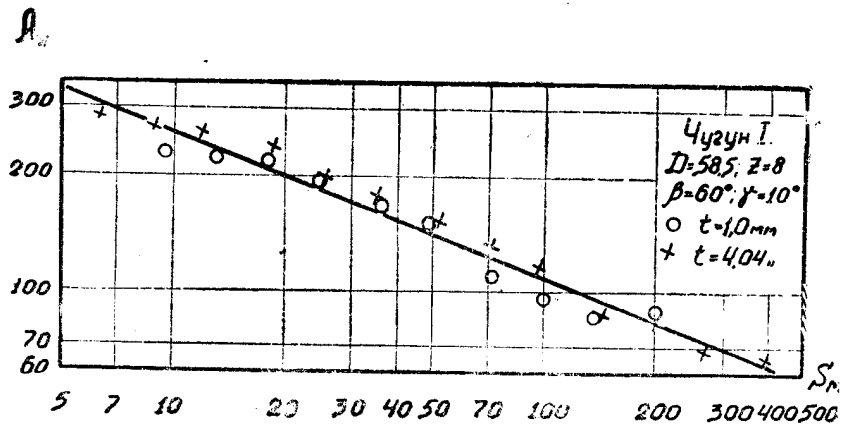


Рис. 58.

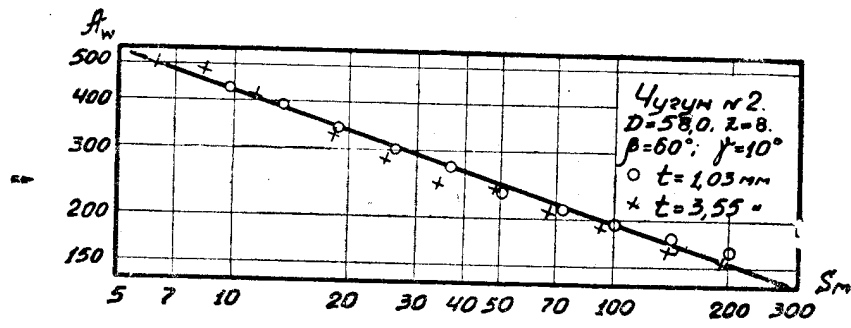


Рис. 59.

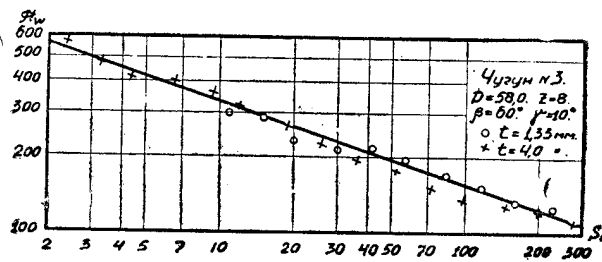


Рис. 60.

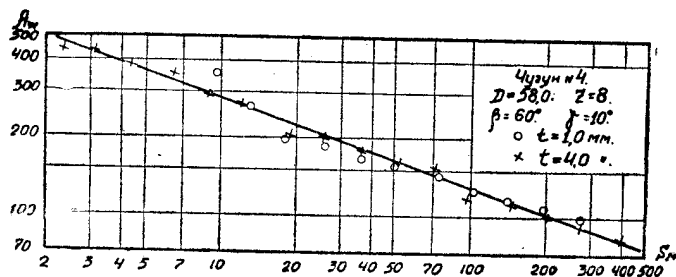


Рис. 61.

Удовлетворительное совпадение результатов опытов, проведенных в разное время, служит хорошим контролем для всей аппаратуры и показателем достоверности полученных результатов. Основные опыты по стали 1040—у были проведены 27.2.37 года, повторные 25.3.37. Основные по стали 5140—н проведены 25.2.37, повторные 21.3.38.

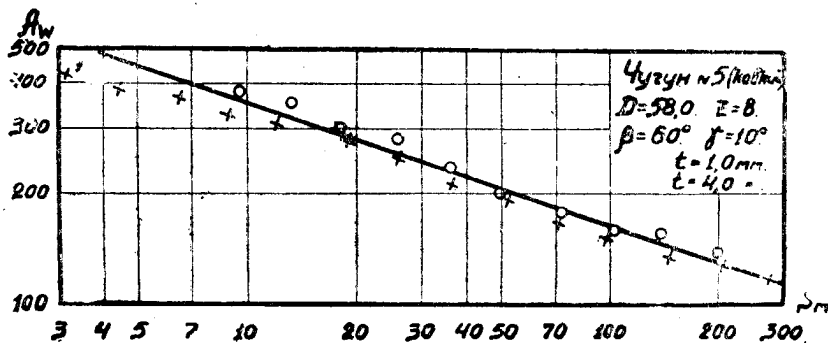


Рис. 62.

В результате обработки экспериментальных данных в виде графиков рис. 38—63 нами получены значения величин λ и k для работы цилиндрического фрезера, представленные в таблице 10.

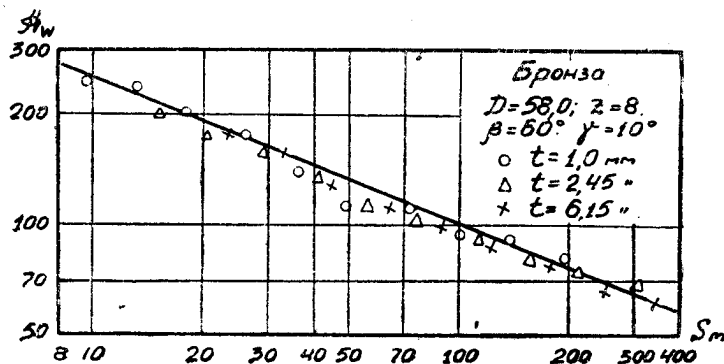


Рис. 63.

Значения λ и k дают хорошее совпадение с результатами ранее проведенных нами работ и если провести их графическое сравнение, то мы получили бы наложение одних результатов на другие.

Полученные значения λ и k делают выражения 1, 2, и 3 вполне конкретными.

Кроме того преобразованием выражения 3 можно получить следующую зависимость.

$$N_e = C_N \cdot n \cdot b \cdot S_z^{q_N} \cdot t^{y_N} \cdot Z \cdot D^{x_N} \text{ лош. сил.} \quad 12$$

Отсюда же может быть получено и выражение средней окружной силы на фрезере

$$P = \frac{4500 N_e}{V} = \frac{4500 N_e \cdot 1000}{\pi D n}$$

$$P = C_p \cdot b \cdot S_z^{q_p} \cdot t^{y_p} \cdot Z \cdot D^{x_p} \quad 13$$

В этих выражениях

$$C_N = \frac{2^{\kappa+1}}{k+2} \cdot \frac{\lambda}{1000.4500};$$

$$C_p = \frac{2^{\kappa+1}}{k+2} \cdot \frac{\lambda}{\pi};$$

$$q_N = q_p = \kappa + 1;$$

$$y_N = y_p = \frac{k+2}{2};$$

$$x_N = -\frac{k}{2};$$

$$x_p = -\frac{k}{2} - 1$$

Значения этих величин даны в табл. 11.

Таблица 11

№	Обрабатываемый материал	C_N	q_N	y_N	x_N	C_p	x_p
1	Сталь 1010—П	0,0000245	0,63	0,815	0,185	35	-0,815
2	" 1020—П	0,0000249	0,63	0,815	0,185	35,7	-0,815
3	" 1020—Н	0,000026	0,635	0,817	0,182	37,2	-0,817
4	" 1035—П	0,0000261	0,7	0,85	0,15	37,4	-0,85
5	" 1035—Н	0,000029	0,71	0,855	0,145	41,4	-0,855
6	" 1040—П	0,0000278	0,71	0,855	0,145	39,8	-0,855
7	" 1040—О	0,0000293	0,69	0,845	0,155	42	-0,845
8	" 1040—Н	0,0000293	0,7	0,85	0,15	42	-0,85
9	" 1040—У	0,0000321	0,7	0,85	0,15	46	-0,85
10	" 1050—О	0,0000327	0,74	0,87	0,13	46,8	-0,87
11	" 5120—П	0,0000272	0,66	0,83	0,17	39	-0,83
12	" 5120—Н	0,0000272	0,64	0,82	0,18	39	-0,82
13	" 5140—П	0,0000293	0,705	0,852	0,147	42	-0,852
14	" 5140—О	0,0000302	0,715	0,857	0,142	43,2	-0,857
15	" 5140—Н	0,000031	0,74	0,87	0,13	44,4	-0,87
16	" 5145—П	0,0000344	0,72	0,86	0,14	49,3	-0,86
17	" 3120—Н	0,0000295	0,66	0,83	0,17	42,3	-0,83
18	" 3140—П	0,0000306	0,72	0,86	0,14	43,8	-0,86
19	" 3340—О	0,0000374	0,74	0,87	0,13	53,5	-0,87
20	" 3340—У	0,0000401	0,75	0,875	0,125	57,5	-0,875
21	Чугун № 1	0,0000099	0,62	0,81	0,19	14,1	-0,81
22	" № 2 перлитный	0,0000202	0,67	0,835	0,165	28,9	-0,835
23	" № 3 легирован.	0,0000168	0,67	0,835	0,165	24,0	-0,835
24	" № 4 легирован.	0,0000132	0,65	0,825	0,175	18,9	-0,825
25	" № 5 ковкий	0,0000172	0,67	0,835	0,165	24,6	-0,835
26	Бронза	0,0000089	0,6	0,8	0,2	12,8	-0,8

Так как в наших опытах фигурировали материалы с большим диапазоном твердостей, мы попытались постоянные λ и k поставить в зависимости от твердости по Бринелю. На рис. 64 в простых координатах представлена для сталей зависимость $\lambda-f(H_B)$. Эта же зависимость на рис. 65 дана в логарифмических координатах. Расположение точек относительно проведенной средней прямой таково, что наибольшее отклонение точек от прямой не превышает 10%. На рис. 66 дана зависимость для сталей— $K=f(H_B)$ в логарифмических координатах.

Такие же графики для чугунов даны на рис. 67 и 68. Здесь точки с хвостиками взяты из наших прошлых работ. Можно констатировать хоро-

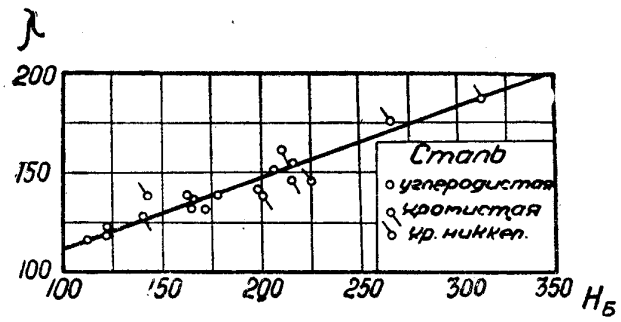


Рис. 64.

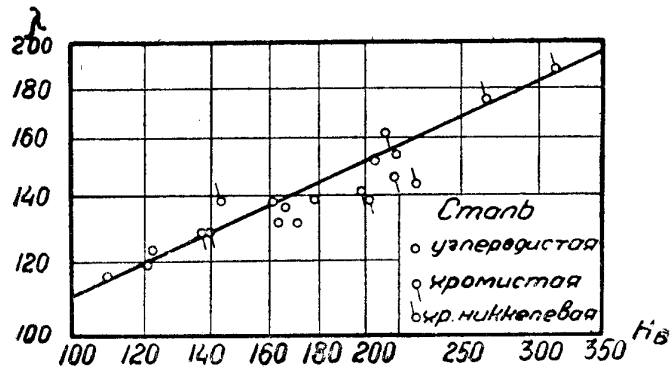


Рис. 65.

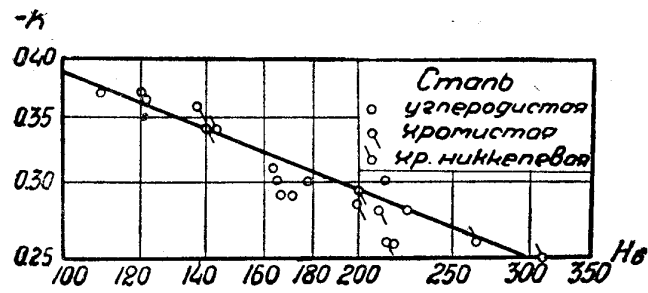


Рис. 66.

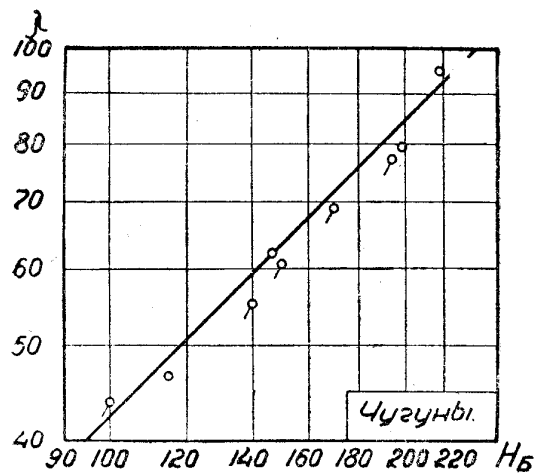


Рис. 67.

шее совпадение их с данными настоящего исследования. Кроме того можно заключить, что, судя по графикам 67 и 68, чугуны дают более точную зависимость постоянных λ и k от H_B . Ковкий чугун на этих графиках нами не помещен, т. к., обладая свойствами вязкости, он имеет значительно большее сопротивление резанию, чем обычный чугун, имеющий одинако-

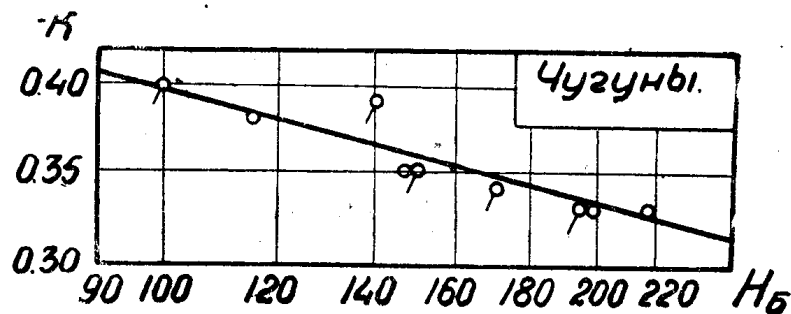


Рис. 68.

вую с ним твердость. Поэтому он не может быть включен в общую зависимость.

На основании рисунка 64—68 можно дать следующие аналитические зависимости.

Для сталей:

$$\lambda = 13,5 H_B^{0,455} \quad 14$$

$$\lambda = 74,6 + 0,37 H_B \quad 15$$

$$K = - \frac{2,5}{H_B^{0,403}} \quad 16$$

$$C_N = 0,00000287 H_B^{0,455} \quad 17$$

$$C_p = 4,11 H_B^{0,455} \quad 18$$

Для чугунов.

$$\lambda = 0,42 H_B \quad 19$$

$$K = - \frac{1,34}{H_B^{0,263}} \quad 20$$

$$C_N = 0,0000000895 H_B \quad 21$$

$$C_v = 0,128 H_B \quad 22$$

По этим зависимостям, зная твердость обрабатываемого материала, можно подсчитать его динамические постоянные процесса фрезерования. Причем нужно представлять себе, что такой подсчет для сталей может дать отклонения до 10% от действительных значений. Для чугунов эти зависимости можно считать практически достаточно точными.

В заключение раздела о цилиндрическом фрезере напомним, что, пользуясь графиками удельной работы A_w (рис. 38—63), можно просто подсчитать затрату мощности, если для заданного режима определить среднюю толщину стружки по выражению:

$$S_m = S_z \sqrt{\frac{t}{D}},$$

для полученного значения S_m по графику для соответствующего обрабатываемого материала найти соответствующее значение A_w и сделать подсчет мощности по выражению:

$$N_e = \frac{A_w \cdot b \cdot t \cdot S}{1000 \cdot 4500} \text{ лощ. сил.}$$

Такой метод подсчета проще, т. к. не требует возведения переменных в дробные степени, но он дает возможность определить мощность по заданному режиму, но не режим, использующий данную мощность.

Опыты с торцевым фрезером.

Здесь мы точно так же, как и при работе цилиндрическим фрезером прежде всего обратились к определению зависимости крутящего момента от скорости резания при всех прочих постоянных условиях ($b, t, S_z, D = \text{const.}$). Рис. 69, представляющий результаты этой серии опытов, показывает, что скорости резания в пределах от 6,8 до 30/мин не оказывают никакого влияния на сопротивление резанию. Поэтому мы все последующие опыты с торцевым фрезером проводили при наименьшей скорости резания, чему соответствовало число оборотов фрезера в минуту

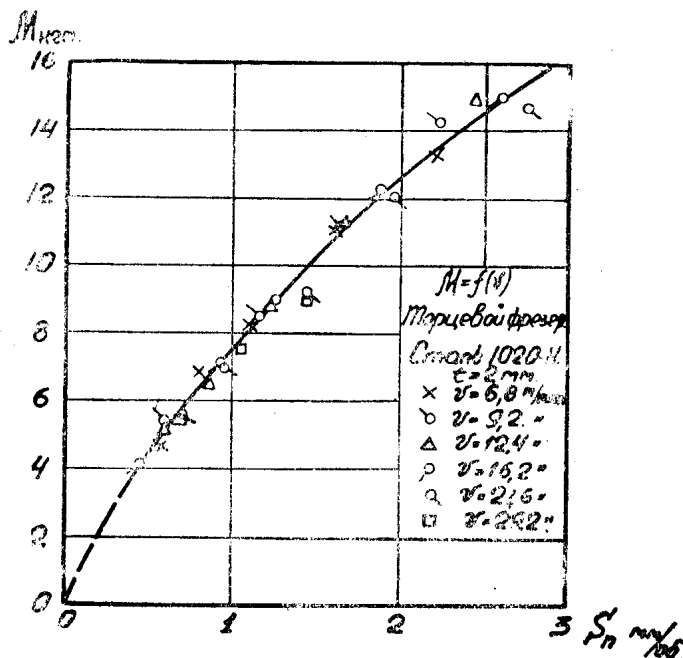


Рис. 69.

$n = 34$. Приведенные таблицы 12—18 содержат значения крутящих моментов, полученных при работе торцевым фрезером по различным обрабатываемым материалам. Во всех случаях работа велась с шириной, равной диаметру фрезера. Данные таблицы крутящих моментов пересчитывались на удельную работу и строились графики (рис. 70—95).

При фрезеровании сталей 1010—п, 1020—н, 5120—п глубина резания 6 мм нами осуществлена не была, так как, ввиду очень значительной вязкости этих сталей, при этой глубине резания получалось заклинивание стружки между зубьями, что делало опыты невозможными и грозило поломкой фрезера.

Ряд серий опытов с совершенно одинаковыми условиями и здесь, как и при работе с цилиндрическим фрезером, нами был повторен в разное время с целью контроля получаемых результатов.

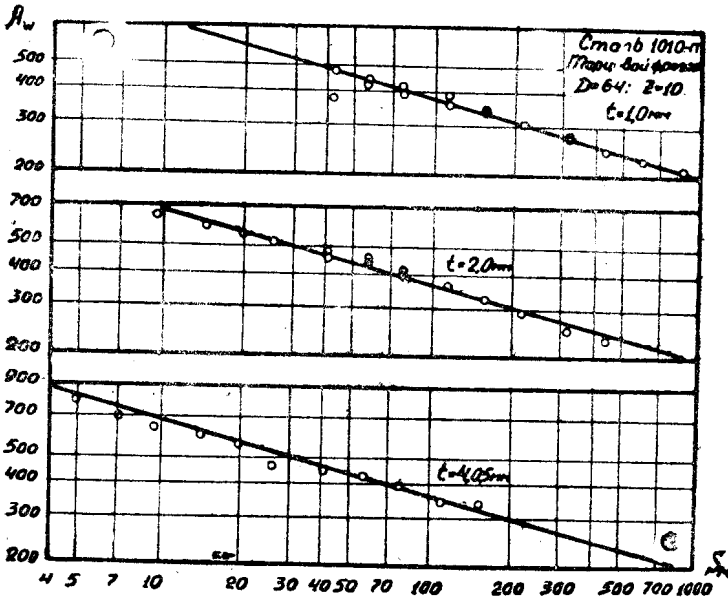


Рис. 70.

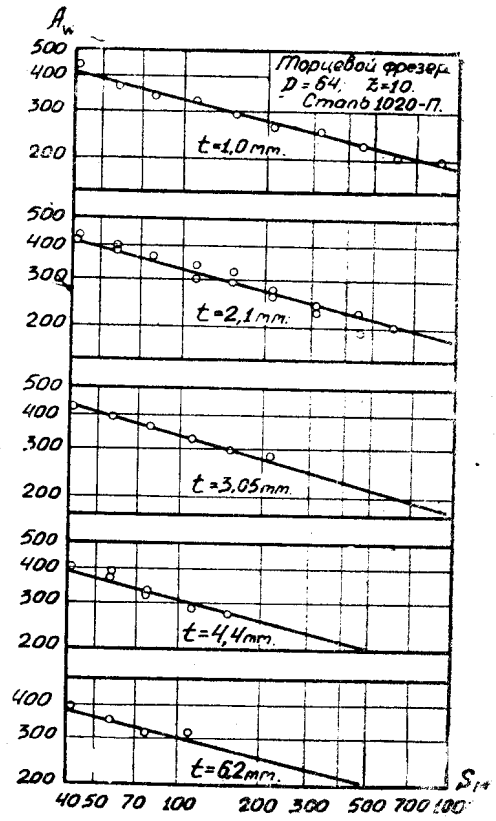


Рис. 71.

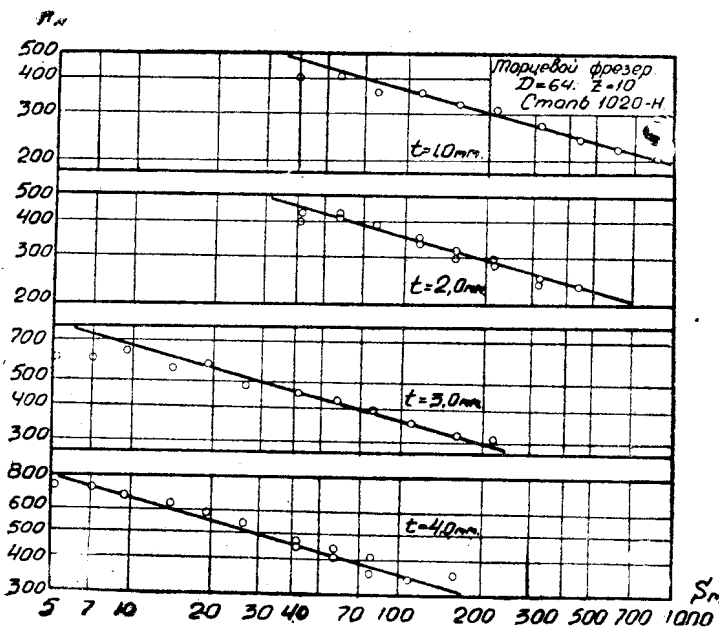


Рис. 72.

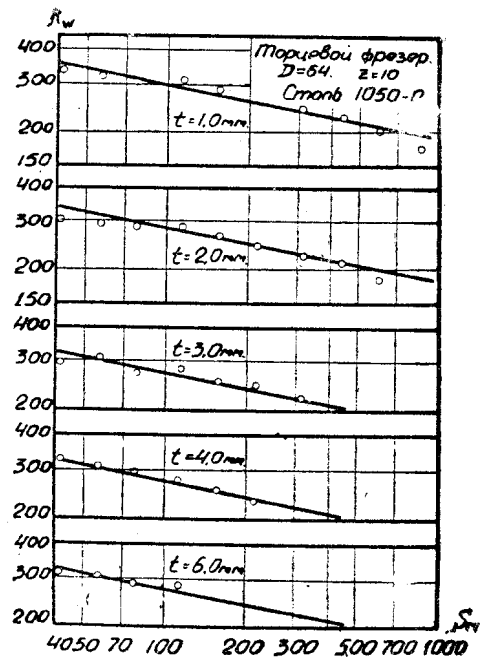


Рис. 75.

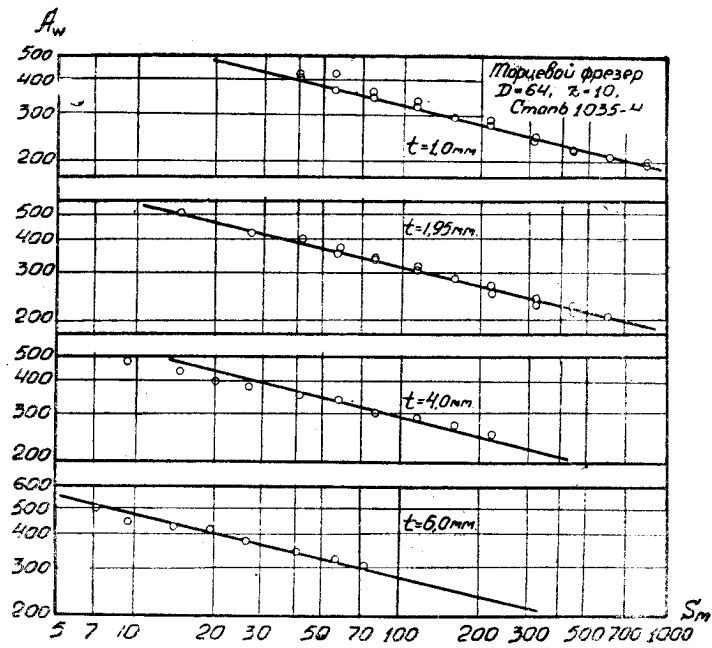


Рис. 74.

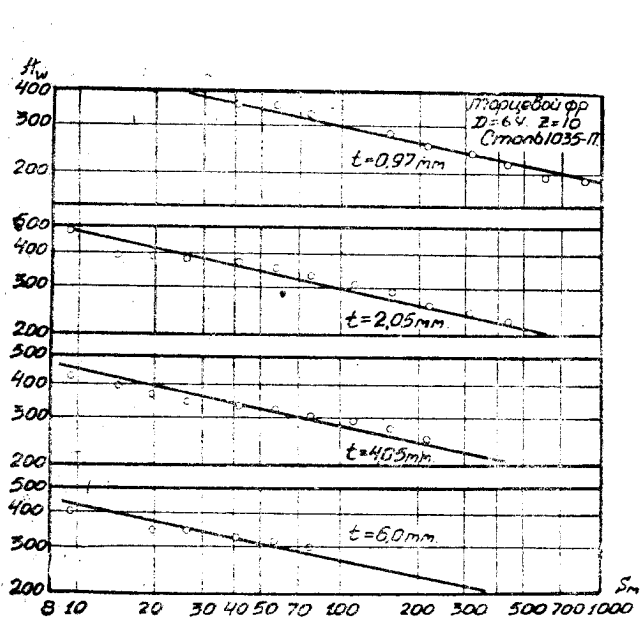


Рис. 73.

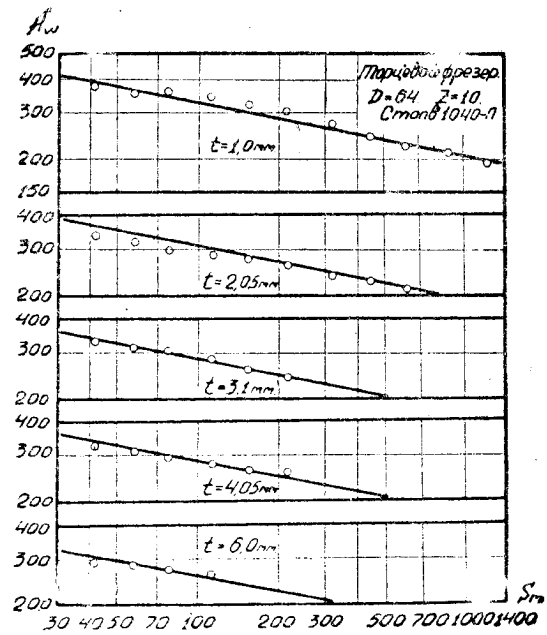


Рис. 76.

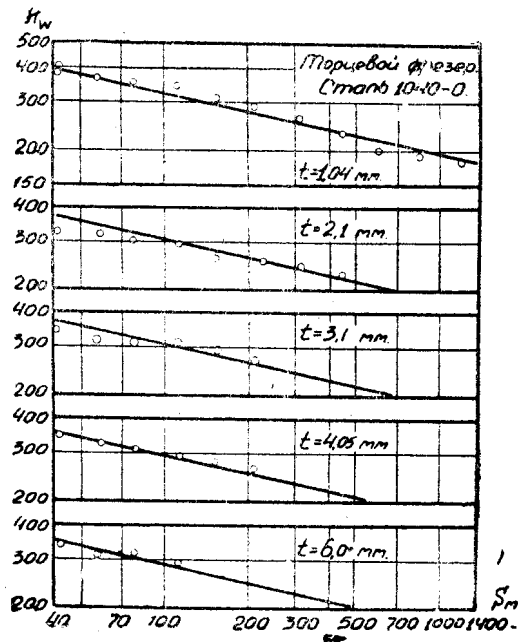


Рис. 77.

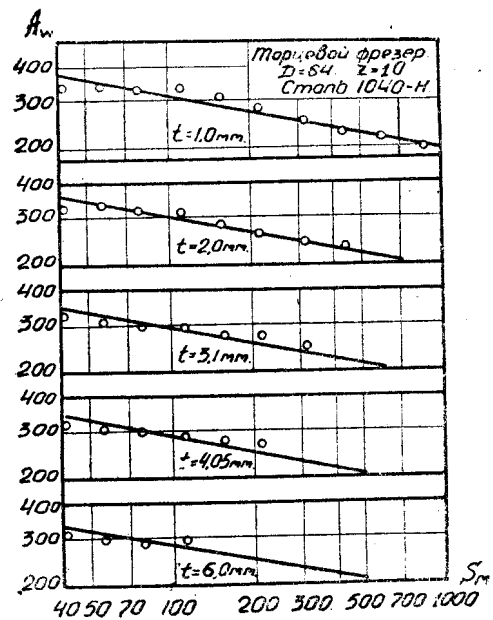


Рис. 78.

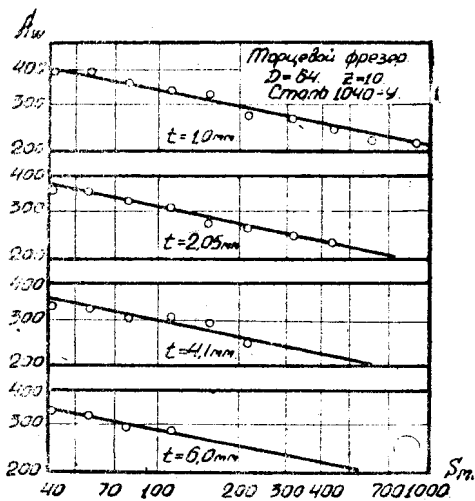


Рис. 79.

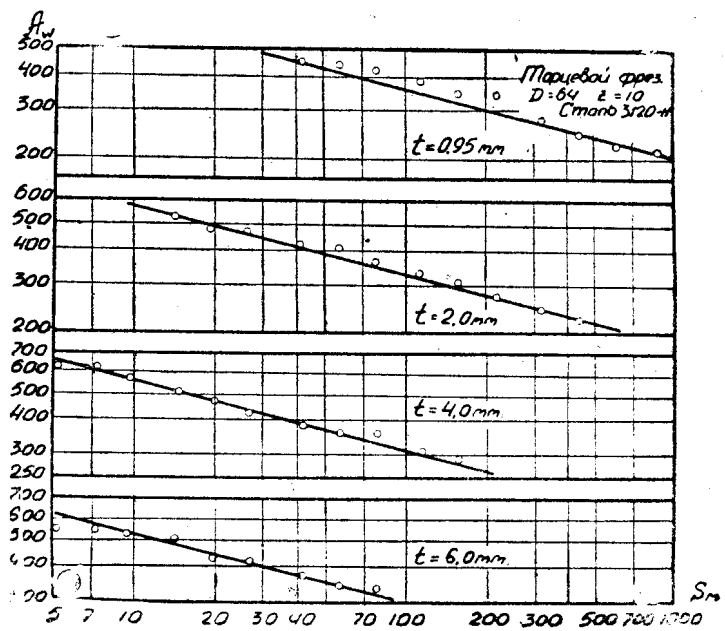


Рис. 80.

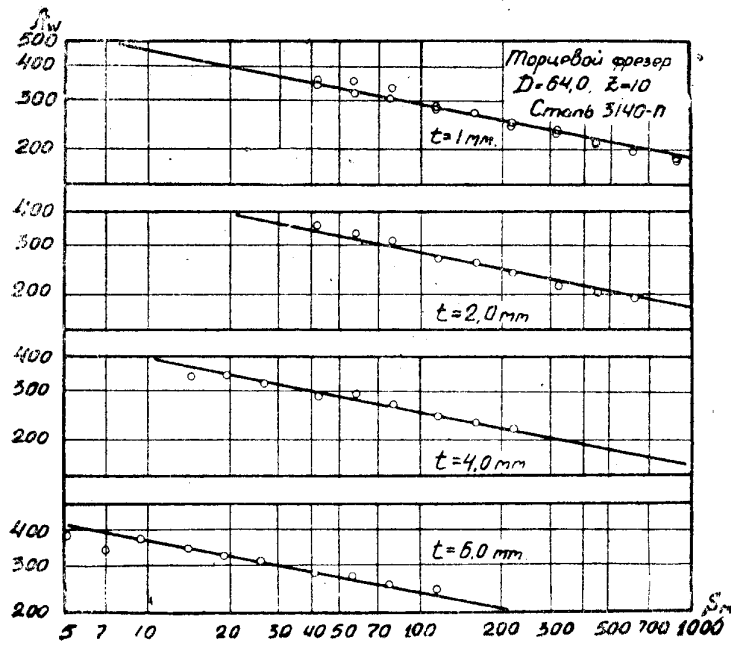


Рис. 81.

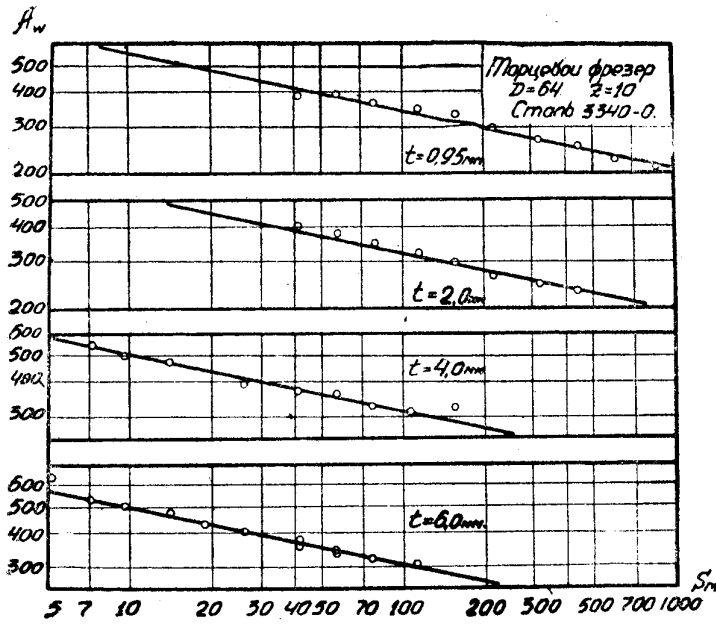


Рис. 82.

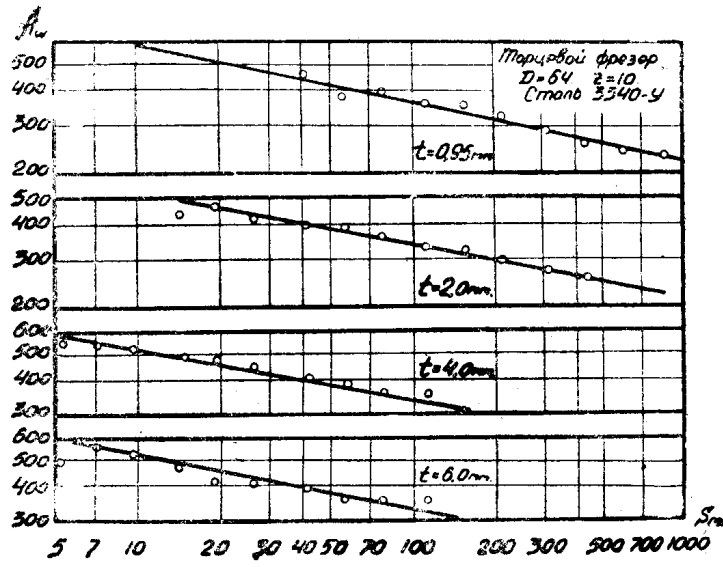


Рис. 83.

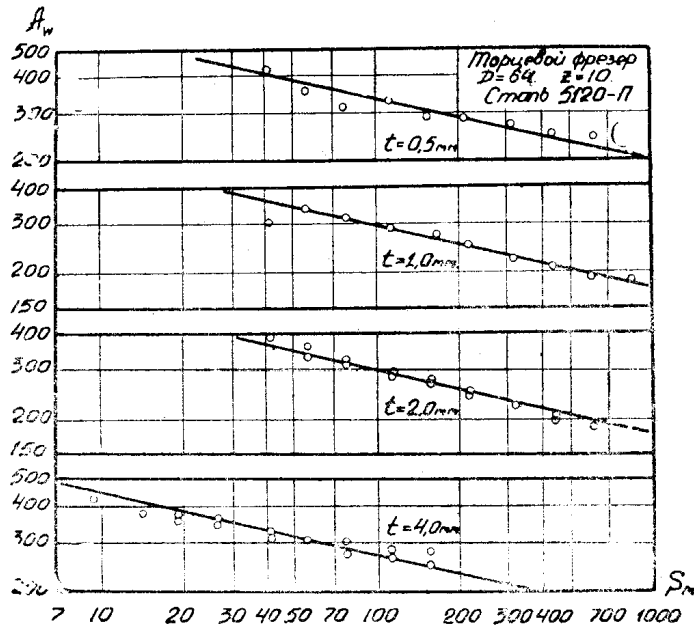


Рис. 84.

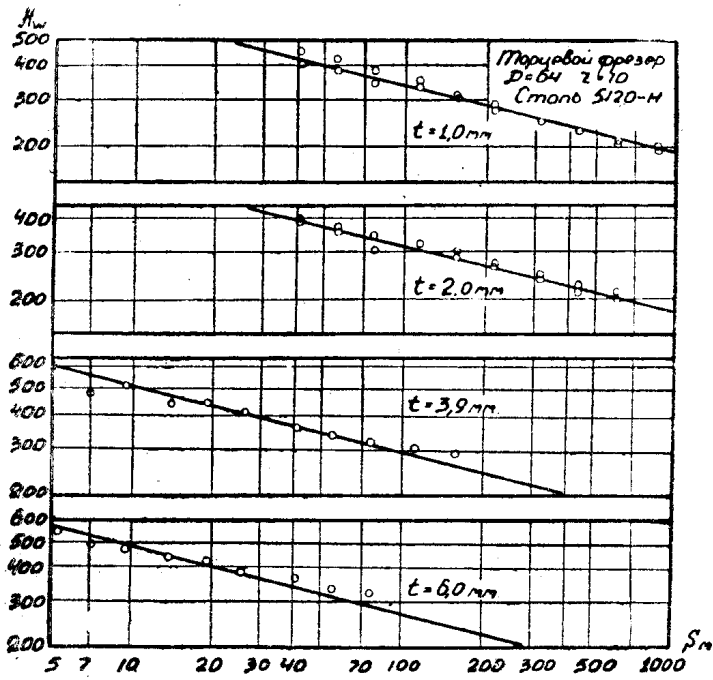


Рис. 85.

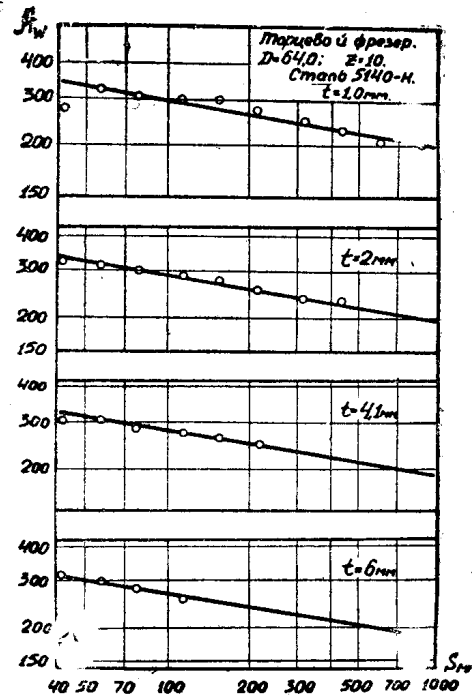


Рис. 88.

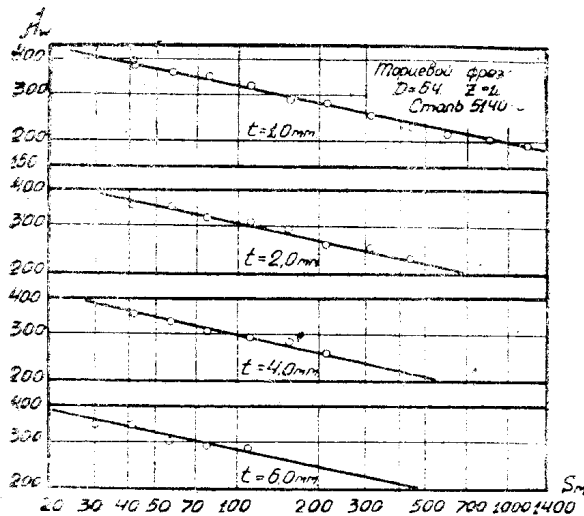


Рис. 86.

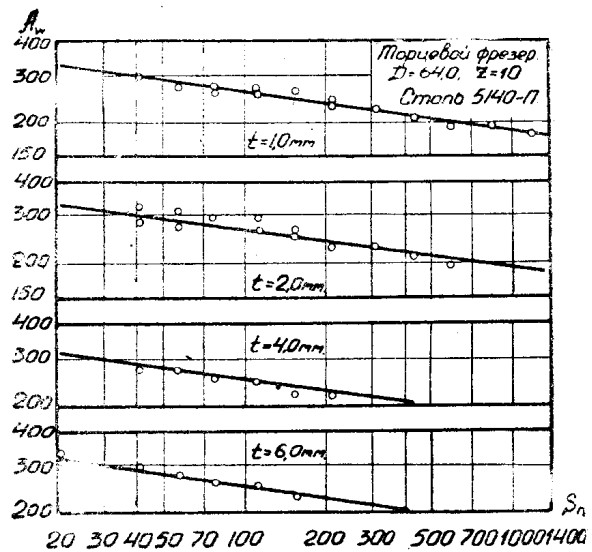


Рис. 87.

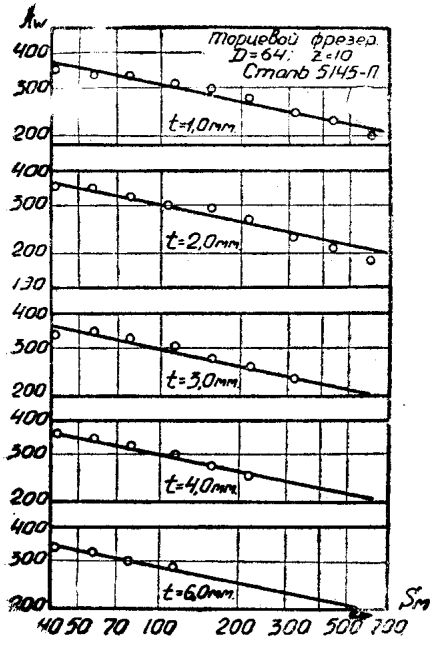


Рис. 89.

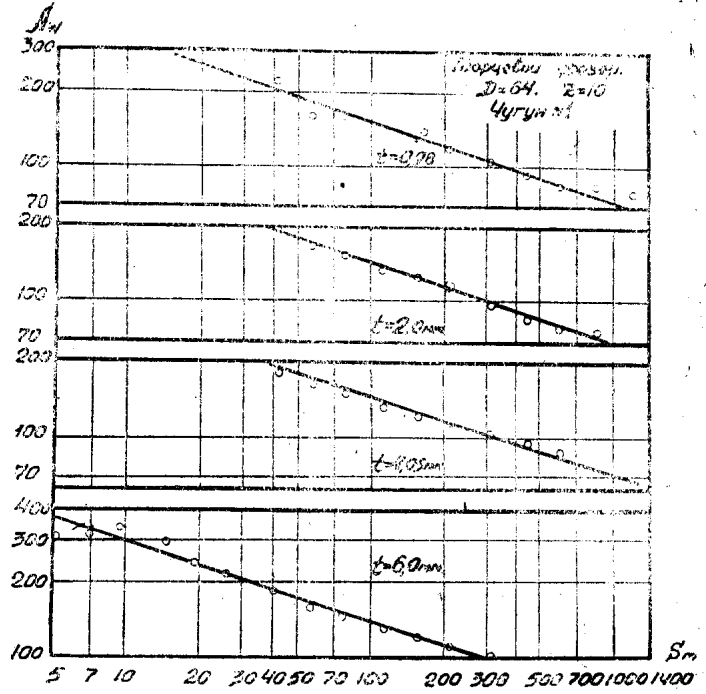


Рис. 90.

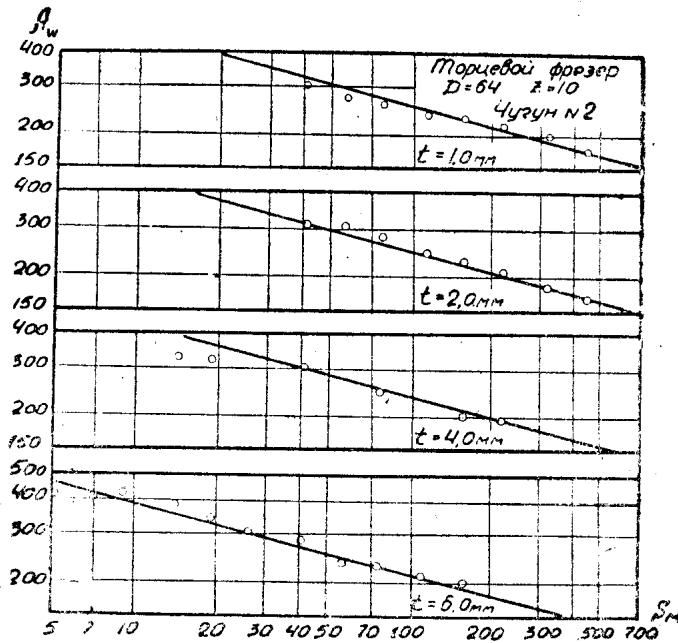


Рис. 91.

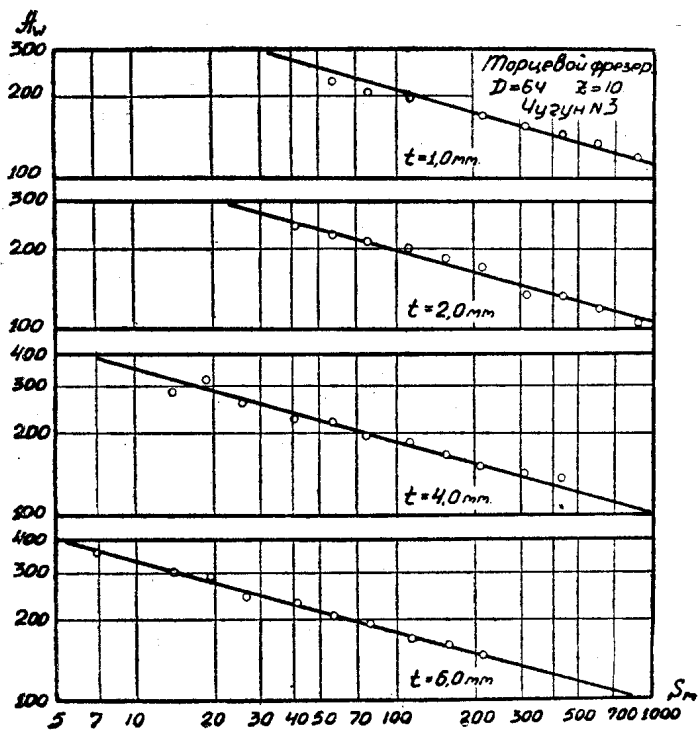


Рис. 92.

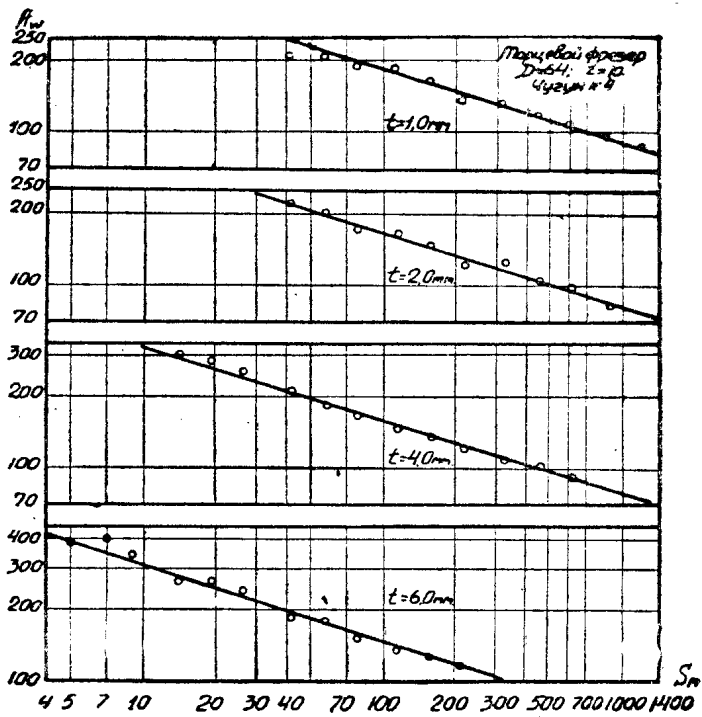


Рис. 93.

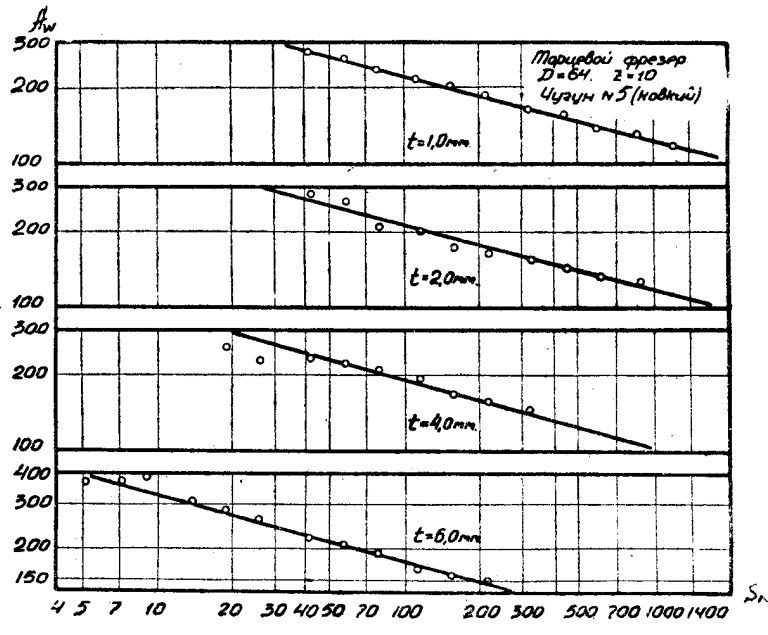


Рис. 94.

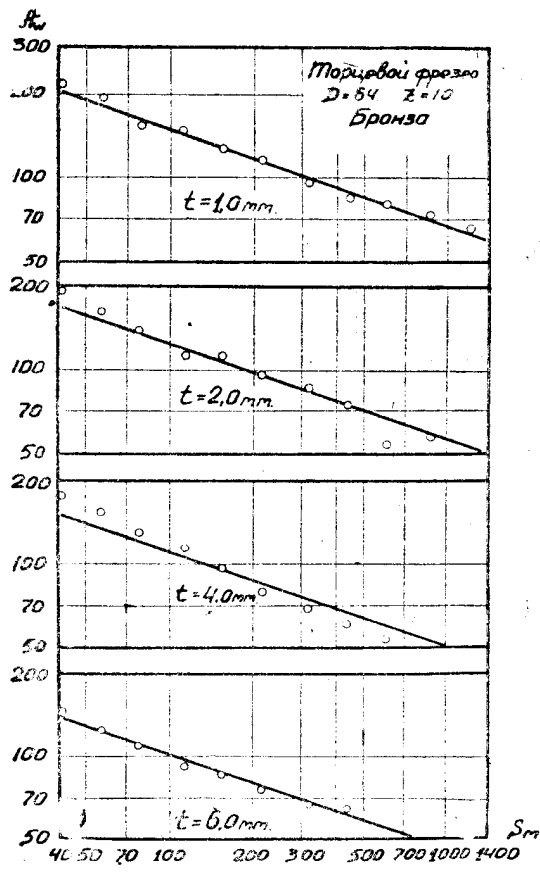


Рис. 95.

Крутящие моменты в килограммомиллиметрах при работе фрезера. Диаметр фр. $D=64$; число зуб. цов $Z=10$; ширина фрезерования $b=D=64$ мм.

Обрабатываем. материал	С т а л ь 1010—п					С т а л ь 1020—п					С т а л ь 1020—н									
	1.0	1.0	2.0	2.0	4.05	1.0	2.0	2.10	3.05	4.40	4.40	6.20	1.0	2.0	2.0	2.1	3.0	4.0	4.1	
$t_{\text{ММ}}$	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
S_z подача на 1 зуб	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
0.0073	—	—	—	—	2348	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	1400	2200	—	—
0.0100	—	—	—	—	2857	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	1850	2900	—	—
0.0134	—	—	1788	—	3485	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	2650	3695	—	—
0.0200	—	—	2408	—	4865	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	3445	5195	—	—
0.0272	—	—	3096	—	6143	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	4795	6590	—	—
0.0370	—	—	3920	—	6942	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	5445	8090	—	—
0.0585	2248	2824	5545	—	10635	2548	4805	5369	7715	10709	10784	14331	2400	4650	5100	4874	8190	11085	10824	—
0.0805	3496	3595	7340	—	14147	2896	6144	6759	9878	13982	13674	17757	3350	6750	7050	6942	10335	14475	13634	—
0.1100	4445	4715	8938	—	17360	3695	7990	8390	12279	15965	16538	22075	4000	8600	8600	8969	13030	18605	16364	—
0.1590	5893	6123	11880	—	22371	5194	10285	11456	16105	20448	—	31192	5800	11280	11482	11540	17015	—	22750	—
0.2210	7640	7790	14770	—	30467	6543	12678	15107	20200	27136	—	—	7250	13225	—	14620	21335	—	32618	—
0.3000	9488	9313	17710	—	—	8140	15856	17360	25964	—	—	—	9400	17660	—	17608	28550	—	—	—
0.4460	12530	12193	23260	—	—	11488	20738	23212	—	—	—	—	12230	22520	—	22668	—	—	—	—
0.6210	15420	15442	28800	—	—	14025	24805	—	—	—	—	—	15270	29085	—	—	—	—	—	—
0.8400	18800	19135	—	—	—	17760	—	36733	—	—	—	—	19000	—	—	—	—	—	—	—
1.2100	—	25620	—	—	—	24395	—	—	—	—	—	—	25325	—	—	—	—	—	—	—
1.6850	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—

Крутящие моменты в килограммомиллиметрах при работе торцевого фрезера. Диаметр фр. $D=64$;
число зубцов $Z=10$; ширина фрезерования $b=D=64$ мм

Обрабатываем. материал	С т а л ь 1040—п										С т а л ь 1040—о										С т а л ь 1040—н										С т а л ь 1040—у								
	1.0		2.05		3.10		4.05		6.0		1.04		2.10		3.10		4.05		6.0		1.0		2.0		3.1		4.05		6.0		1.0		2.06		4.1		6.0		
	1.0	2.05	3.10	4.05	6.0	1.04	2.10	3.10	4.05	6.0	1.0	2.0	3.1	4.05	6.0	1.0	2.0	3.1	4.05	6.0	1.0	2.0	3.1	4.05	6.0	1.0	2.06	4.1	6.0	1.0	2.06	4.1	6.0						
0.0073	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—			
0.0100	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—		
0.0134	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	4615	
0.0200	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	6293	
0.0272	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	8123	
0.0370	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	11033	
0.0585	2198	4071	5894	7790	10435	2400	4145	6213	8290	11989	1998	3827	5844	7566	11082	1998	3827	5844	7566	11082	2300	4300	5850	7467	10958	16120	19445	27577	—	—	—	—	—	—	—	—	12059		
0.0805	2897	5254	7591	10136	14004	3173	5568	7990	10843	15667	2747	5444	7467	10011	14190	2747	5444	7467	10011	14190	3150	5850	7467	10958	16120	19445	27577	—	—	—	—	—	—	—	—	16120			
0.1100	3956	6667	10136	12961	18313	4145	7117	10834	14082	21133	3696	7072	10061	13340	19148	3696	7072	10061	13340	19148	3990	7467	10958	16120	19445	27577	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	19445		
0.1590	5594	9508	13674	18055	25548	5793	9987	15218	18899	28720	5369	10038	14475	18432	28162	5369	10038	14475	18432	28162	5410	10186	13883	19445	27577	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	27577	
0.2210	7272	12777	17658	23779	—	7092	12428	20041	25366	—	7052	12677	18552	24738	—	7052	12677	18552	24738	—	7350	12400	16298	25647	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
0.3000	9163	16155	21993	31603	—	8989	16522	25042	32531	—	8690	15995	25120	32641	—	8690	15995	25120	32641	—	8250	16298	25647	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
0.4460	12353	21860	—	—	—	12278	23384	—	—	—	11680	22104	34652	—	11680	22104	34652	—	—	—	12100	22915	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
0.6210	15586	28900	—	—	—	15243	30259	—	—	—	14590	29708	—	—	14590	29708	—	—	—	—	15200	29409	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
0.8400	18949	36473	—	—	—	17808	—	—	—	—	18924	—	—	—	18924	—	—	—	—	—	18750	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
1.2100	25689	—	—	—	—	24688	—	—	—	—	24905	—	—	—	24905	—	—	—	—	—	25866	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
1.6850	32723	—	—	—	—	33052	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—

Таблица 16.

Крутящие моменты в килограммомиллиметрах при работе торцевого фрезера.
Диаметр фр. $D=64$; число зубцов $Z=10$; ширина фрезерования $b=D=64$ мм

Обрабатываемый материал	С т а л ь 5120—п										С т а л ь 5120—н					
	0.50	1.00	1.03	2.00	2.00	4.00	4.10	1.0	1.0	1.0	1.0	2.0	2.0	2.0	3.9	6.0
t мм																
S_z подача на 1 зуб																
0.0073	—	—	—	—	—	1168	—	—	—	—	—	—	—	—	—	2398
0.0100	—	—	—	—	—	1497	—	—	—	—	—	—	—	—	—	2997
0.0134	—	—	—	—	—	2295	2296	—	—	—	—	—	—	—	—	3820
0.0200	—	—	—	—	—	2894	3245	—	—	—	—	—	—	—	—	5370
0.0272	—	—	—	—	—	4043	4394	—	—	—	—	—	—	—	—	7042
0.0370	—	—	—	—	—	5342	5843	—	—	—	—	—	—	—	—	8640
0.0585	1249	—	1847	—	4495	7940	7890	—	2348	—	—	—	—	—	—	13075
0.0805	1448	—	2846	5445	5893	10283	10735	—	3487	3164	5993	5943	—	—	—	16165
0.1100	1697	3447	3595	7042	7290	13670	13075	3845	4245	3929	7590	6742	—	—	—	21709
0.1590	2646	4594	4794	9588	9188	18950	18365	5344	5654	5394	10385	10285	—	—	—	—
0.2210	3195	6043	6393	12180	12500	25875	24295	6742	6952	6942	12678	13474	—	—	—	—
0.3080	4294	7891	7990	15070	15540	—	—	8290	8889	8750	15870	16530	—	—	—	—
0.4460	6092	10335	10485	20190	20300	—	—	11234	11282	11282	21285	22412	—	—	—	—
0.6210	7840	13172	13875	25175	25865	—	—	14473	14072	14371	27285	28697	—	—	—	—
0.8400	10235	16065	17063	31990	—	—	—	17858	18403	17817	33970	36800	—	—	—	—
1.2100	13075	—	24098	—	—	—	—	23160	23915	24688	—	—	—	—	—	—
1.6850	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—

Крутящие моменты в килограммомиллиметрах при работе торцевого фрезера. Диаметр фр. D=64; число зубцов Z=10; ширина фрезерования b=D=64 мм

Обрабатываем. материал	Сталь 5140—п						Сталь 5140—о				Сталь 5140—н					Сталь 5145—п				
	1.00	0.98	2.00	2.00	2.00	6.10	1.0	2.0	4.0	6.0	1.0	2.05	4.1	6.1	1.0	2.0	3.0	4.0	6.1	
	S _z подача на 1 зуб						1.0	2.0	4.0	6.0	1.0	2.0	4.0	6.0	1.0	2.0	3.0	4.0	6.0	
0.0073	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
0.0100	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
0.0134	—	—	—	—	2788	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
0.0200	—	—	—	—	4145	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
0.0272	—	—	—	—	5634	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
0.0370	—	—	—	—	8889	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
0.0585	1758	1699	3397	3905	6743	10685	2298	4215	8270	12278	1631	3971	7466	11531	2100	4250	6000	8450	12275	
0.0805	2218	1998	4470	5195	9189	13874	2930	5726	10874	14894	2678	5354	10236	14949	2750	5670	8530	11250	16260	
0.1100	3072	2847	6293	6593	11630	17708	3896	7192	13693	19346	3496	6892	13075	19207	3750	7160	10950	14588	20633	
0.1590	4375	4070	8623	9413	16354	24640	5274	10037	18750	27763	4869	9578	18552	25474	5070	9920	14847	19440	28418	
0.2210	5953	5619	11349	11805	20329	31295	6433	13175	24933	—	6668	12637	24472	—	6700	13115	18795	24775	—	
0.3000	7092	7392	13973	14470	27137	—	8640	15945	30830	—	8520	16045	31652	—	8450	16240	23795	31390	—	
0.4460	10246	9888	20745	20513	—	—	11292	22619	—	—	11471	22312	—	—	11250	21206	32000	—	—	
0.6210	13185	13415	26843	26550	—	—	14172	29085	—	—	14803	30412	—	—	14470	27825	—	—	—	
0.8400	16423	16389	33858	34295	—	—	18080	—	—	—	17956	—	—	—	17187	32050	—	—	—	
1.2100	23508	22365	—	—	—	—	25049	—	—	—	25827	—	—	—	—	—	—	—	—	
1.6850	31120	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	

Крутящие моменты в килограммомиллиметрах при работе торцевого фрезера. Диаметр фр. $D = 64$;
число зубцов $Z = 100$, ширина фрезерования $b = D = 64$ мм.

Обрабатываем. материал	Ч у г у н № 1				Ч у г у н № 2				Ч у г у н № 3			
	0.98	2.00	4.05	6.00	1.0	2.0	4.0	6.0	1.0	2.0	4.0	6.0
0.0073	—	—	—	1424	—	—	—	1900	—	—	—	—
0.0100	—	—	—	2048	—	—	—	2550	—	—	—	2200
0.0134	—	—	—	3071	—	—	—	3495	—	—	—	3595
0.0200	—	—	—	3495	—	—	2700	4645	—	—	2300	3745
0.0272	—	—	—	3995	—	—	3595	5645	—	—	3545	4845
0.0370	—	—	—	4870	—	—	—	6990	—	—	3895	5595
0.0585	1299	2323	4345	6518	1800	3695	7190	10035	—	2900	5395	8190
0.0805	1299	2696	5493	7930	2250	5045	—	11580	1850	3695	7190	10085
0.1100	1778	3445	6800	9867	2900	6195	11035	15320	2300	4695	8690	12880
0.1590	2297	4485	8759	12527	3845	7940	—	20240	3145	6495	11930	16415
0.2210	3066	5669	11135	16414	5145	10235	18005	26600	—	8190	14920	21930
0.3000	3595	7190	14170	20040	6540	12480	23705	—	5195	10335	18355	26650
0.4460	4715	8750	19206	27038	8990	16315	—	—	7090	12030	25280	—
0.6210	5824	10784	24620	—	11035	20840	—	—	9090	16415	33810	—
0.8400	7260	13375	30888	—	—	25865	—	—	11335	20740	—	—
0.2100	10435	18730	—	—	—	—	—	—	14625	25770	—	—
0.6850	13450	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—

Крутящие моменты в килограммомиллиметрах при работе торцевого фрезера. Диаметр фр. $D=64$;
число зубцов $Z=10$, ширина фрезерования $b=D=64$ мм.

Обрабатываем. материал	Ч у г у н № 4								Ч у г у н № 5				Б р о н з а					
	1.0		2.0		4.0		4.0		6.0		1.0		2.0		4.0		6.0	
	1.0	2.0	2.0	4.0	4.0	4.0	4.0	6.0	1.0	2.0	2.0	4.0	4.0	6.0	1.0	2.0	4.0	6.0
t мм																		
S_z подача на 1 зуб																		
0.0073	—	—	—	—	—	—	—	1700	—	—	—	—	—	1648	—	—	—	—
0.0100	—	—	—	—	—	—	—	2500	—	—	—	—	—	2347	—	—	—	—
0.0134	—	—	—	—	—	—	—	2800	—	—	—	—	—	3146	—	—	—	—
0.0200	—	—	—	2450	—	—	—	3200	—	—	—	—	—	3745	—	—	—	—
0.0272	—	—	—	3150	—	—	—	4450	—	—	—	—	—	4694	—	—	—	—
0.0370	—	—	—	3850	—	—	—	5450	—	—	—	—	—	5943	—	—	—	—
9.0585	1249	2648	2648	5050	—	—	—	6650	1648	3396	5493	7840	950	1650	2995	3645	3645	
0.0805	1698	3296	3296	6000	—	—	—	8800	2148	4295	7242	10236	1150	1900	3595	4445	4445	
0.1100	2097	3845	3845	7450	—	—	—	10235	2647	4644	9138	12728	1250	2150	4145	5295	5295	
0.1590	2946	5294	5294	9400	—	—	—	13225	3495	6443	12280	16215	1700	2600	5345	6445	6445	
0.2210	3645	6592	6592	—	—	—	—	17160	4644	7690	14920	21432	2050	3595	6245	8290	8290	
0.3000	4145	7390	7390	—	—	—	—	21480	5693	9937	18900	27285	2550	4195	6990	9935	9935	
0.4460	5993	11233	11233	—	—	—	—	—	7390	14074	26650	—	3145	5545	8990	12930	12930	
0.6210	7390	13177	13177	—	—	—	—	—	9837	17908	—	—	3850	6640	11085	17110	17110	
0.8400	9188	16664	16664	—	—	—	—	—	11732	22470	—	—	4850	6540	13475	—	—	
1.2100	11582	20540	20540	—	—	—	—	—	15773	30543	—	—	6250	10085	—	—	—	
1.6850	14870	—	—	—	—	—	—	—	19745	—	—	—	8250	—	—	—	—	

По таблицам и по графикам видно удовлетворительное совпадение результатов.

На основании графиков 70—95 нами получены значения λ , K и l для работы торцевого фрезера (см. табл. 19).

Таблица 19

Торцевой фрезер

№	Обрабатываемый материал	λ	K	l
1	Сталь 1010—П	200	—0,27	—0,02
2	" 1020—П	186	—0,24	—0,04
3	" 1020—Н	195	—0,26	—0,02
4	" 1035—П	187	—0,21	—0,05
5	" 1035—Н	190	—0,23	—0,09
6	" 1040—П	203	—0,2	—0,09
7	" 1040—О	198	—0,215	—0,05
8	" 1040—Н	197	—0,2	—0,05
9	" 1040—У	213	—0,205	—0,09
10	" 1050—О	190	—0,19	—0,04
11	" 5120—П	188	—0,23	—0,09
12	" 5120—Н	193	—0,25	—0,1
13	" 5140—П	190	—0,16	—0,03
14	" 5140—О	196	—0,2	—0,06
15	" 5140—Н	200	—0,175	—0,04
16	" 5145—П	193	—0,2	—0,04
17	" 3120—Н	203	—0,245	—0,1
18	" 3140—П	187	—0,2	—0,1
19	" 3340—О	210	—0,205	—0,06
20	" 3340—У	225	—0,19	—0,03
21	Чугун № 1	72	—0,32	—0,07
22	" № 2 (перлит.)	142	—0,26	—0,11
23	" № 3 (легирован.)	110	—0,28	—0,1
24	" № 4 (легирован.)	90	—0,31	—0,11
25	" № 5 (ковкий)	123	—0,26	—0,12
26	Б р о н з а	67	—0,34	—0,21

В таблице 19 прежде всего обращает на себя внимание то обстоятельство, что значение λ не растет параллельно с ростом твердости обрабатываемой стали и можно нередко видеть, что более мягкие стали характеризуются более высоким значением λ . Это же было нами уже получено и в прошлой работе с торцевыми фрезерами³⁾. В отношении чугунов можно заметить увеличение λ с увеличением твердости чугуна. Отсутствие закономерности изменения λ у сталей повидимому связано со свойствами пластичности у сталей и с затрудненным отделением стружки на зубе торцевого фрезера, где мы имеем процесс не свободного резания с углом в плане 90° .

По данным Гипромаша постоянная в уравнении мощности увеличивается с ростом твердости обрабатываемого материала, что, как мы видим, не подтверждается экспериментом. По работе Ларина⁵⁾ точно так же, как и у нас, постоянная не всегда повышается с повышением твердости обрабатываемого материала.

Далее следует отметить, что величина l во всех случаях не равна нулю. Вследствие этого глубина резания в уравнениях силы и мощности входит в степени меньшей единицы. Это вполне естественно, так как при работе торцевого фрезера мы имеем участие в процессе резания двух режущих кромок: главной, расположенной по цилиндру и вспомогательной, расположенной по торцу фрезера. Это обстоятельство не учитывается выводами Гипромаша. проф. Резникова⁶⁾ и инж. Рывкина⁷⁾.

В работе Ларина у глубины фрезерования была получена степень больше единицы, что мы считаем результатом неучтенных вредных сопротивлений, регистрируемых динамометром и повышающихся с увеличением глубины фрезерования.

Небезынтересно провести сравнение получаемых по различным данным результатов. Для этого воспользуемся таблицей 7 режимов резания на фрезерных станках Гипромаша, где для случая фрезерования стали $\sigma_B = 60-70 \text{ кг/мм}^2$ торцевым фрезером диаметром 150 мм с числом зубцов 10, при ширине фрезерования 120 мм, глубине 10 мм, подаче на 1 зуб 0,15 мм и числе оборотов фрезера 35 получены мощности по Гипромашу 4,3 л. с., по Рывкину 4,2 л. с. и по Резникову 3,9 л. с. По полученным нами данным для стали 1040—п с $\sigma_B = 64,4 \text{ кг/мм}^2$ подсчет по ф-ле 9 дает $N_e = 3,48 \text{ л. с.}$

Подобное же сравнение с данными проф. Резникова было нами проведено в нашей прошлой работе³⁾, причем во всех случаях мы в опытах получали меньшие крутящие моменты и мощности, чем это получалось подсчетом по данным проф. Резникова.

Уравнение мощности 8 можно превратить в следующую зависимость.

$$N_e = C_N \cdot n \cdot t^{x_p} \cdot S_z^{y_p} \cdot Z \cdot D \quad 23$$

а так как $N_e = \frac{P_v}{4500}$, то уравнение окружной силы на фрезере получим

$$P = C_p \cdot t^{x_p} \cdot S_z^{y_p} \cdot Z \quad 24$$

Из последнего выражения можно получить уравнение мощности

$$N_e = \frac{C_p \cdot t^{x_p} \cdot S_z^{y_p} \cdot Z \cdot V}{4500} \quad 25$$

В этих зависимостях:

$$C_N = \frac{2^{-\frac{K}{2}} \cdot \lambda}{1000 \cdot 4500};$$

$$C_p = \frac{2^{-\frac{K}{2}} \cdot \lambda}{\pi};$$

$$x_p = l + 1;$$

$$y_p = K + 1.$$

Значения всех этих величин даются нами в табл. 20.

На рис. 96 нами построена зависимость величин λ и K от твердости по Бринелю при торцевом фрезеровании чугунов. Здесь точки с хвостиками нанесены по результатам нашей прошлой работы. На основании этого графика получаем следующие зависимости для чугунов.

$$\lambda = 0,6 H_B \quad 26$$

$$K = -\frac{2}{H_B^{0,38}} \quad 27$$

№	Обрабатываемый материал	C_N	C_p	X_p	Y_p
1	Сталь 1010—П	0,0000489	70	0,98	0,73
2	" 1020—П	0,000045	64,5	0,96	0,76
3	" 1020—Н	0,0000475	68	0,98	0,74
4	" 1035—П	0,0000447	64	0,95	0,79
5	" 1035—Н	0,0000458	65,5	0,91	0,77
6	" 1040—П	0,0000482	69	0,91	0,8
7	" 1040—О	0,0000475	68	0,95	0,785
8	" 1040—Н	0,000047	67,3	0,95	0,8
9	" 1040—У	0,0000508	72,7	0,91	0,795
10	" 1050—О	0,0000451	64,6	0,96	0,81
11	" 5120—П	0,0000453	64,9	0,91	0,77
12	" 5120—Н	0,0000471	67,4	0,90	0,75
13	" 5140—П	0,0000447	64	0,97	0,84
14	" 5140—О	0,0000468	67	0,94	0,8
15	" 5140—Н	0,0000472	67,5	0,96	0,825
16	" 5145—П	0,0000461	66	0,96	0,8
17	" 3120—Н	0,0000489	70	0,9	0,755
18	" 3140—П	0,0000445	63,6	0,9	0,8
19	" 3340—О	0,0000502	71,9	0,94	0,795
20	" 3340—У	0,0000535	76,5	0,97	0,81
21	Чугун № 1	0,0000179	25,6	0,93	0,68
22	" № 2	0,0000346	49,6	0,89	0,74
23	" № 3	0,000027	38,6	0,9	0,72
24	" № 4	0,0000222	31,8	0,89	0,69
25	" № 5	0,00003	42,9	0,88	0,74
26	Бронза	0,0000168	24	0,79	0,66

Подобным же графическим построением получены зависимости для сталей:

$$\lambda = 107 \cdot H_B^{0,12} \quad 28$$

$$K = \frac{1,31}{H_B^{0,346}} \quad 29$$

Эти зависимости для сталей имеют точность в пределах $\pm 10\%$ и могут считаться лишь приближенными, так же как подобные им для цилиндрического фрезера.

Подсчет расхода мощности при работе торцевого фрезера можно вести, так же как и для цилиндрического по выражению

$$N_e = A_w \cdot \frac{t \cdot D \cdot S}{1000 \cdot 4500}$$

определяя A_w по соответствующим графикам (рис. 70—95). При $b < D$ необходимо полученную мощность умножить на коэффициент уравнений 9 и 10.

В заключение работы нами была проведена серия опытов с торцевым фрезером, имеющим те же размеры и геометрию, что и вышеописанный, но вместо закругления при переходе с торцевого лезвия на цилиндрическое этот фрезер имел угловое лезвие, наклоненное под углом 45° к плоскости торца. Угловое лезвие имело такие размеры, что при глубинах фрезерования от 1 до 6 мм, имевших место в опытах, стружка не захватывала цилиндрического лезвия и всей шириной своей помещалась на угловом лезвии.

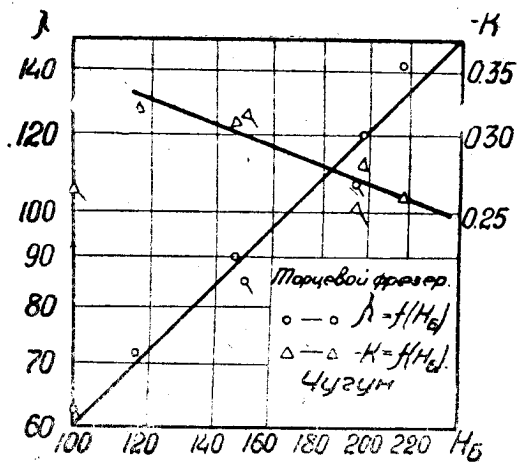


Рис. 96.



Рис. 97.

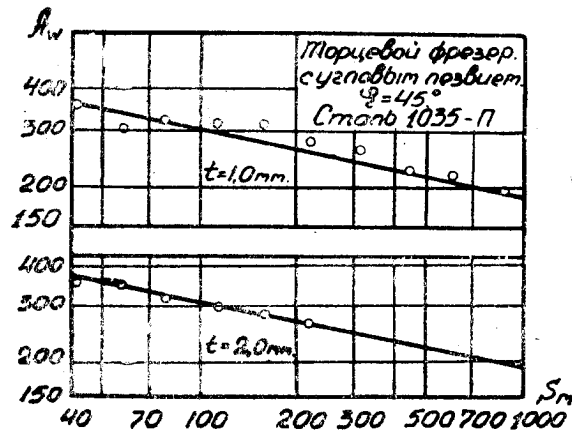


Рис. 98.

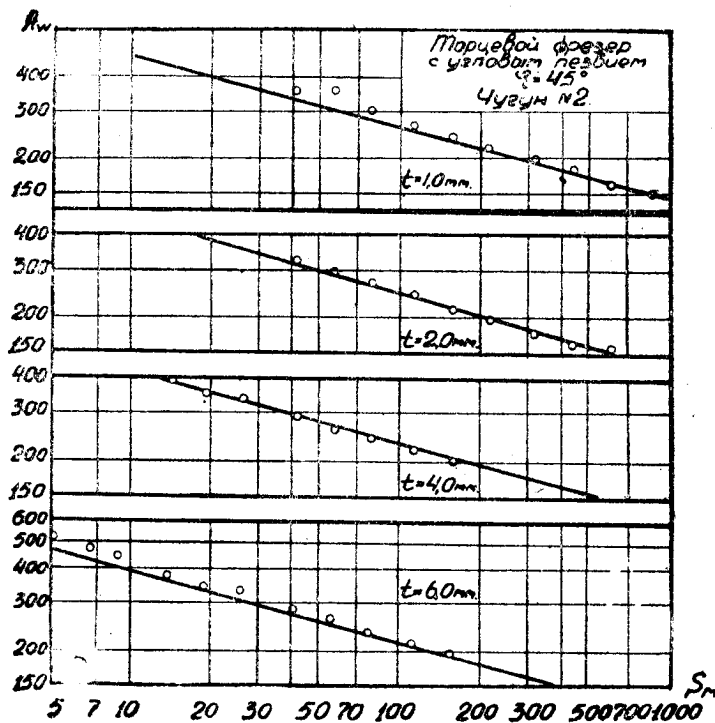


Рис. 99.

Эти опыты нами были поставлены с целью выявления влияния углового лезвия на расход мощности, так как фрезера и особенно фрезерные головки с угловым лезвием имеют широкое распространение в производстве.

Из литературы нельзя получить ясного представления о влиянии углового лезвия на усилия и мощность при фрезеровании. По выводам Рыкина⁷⁾ на зубе с угловым лезвием усилие должно быть больше, нежели на зубе без такового, но экспериментам Ларина получены обратные результаты.

По опытам Шлезингера⁸⁾ с токарными резцами вертикальная составляющая давления резания уменьшается с увеличением угла в плане, но это уменьшение заметно лишь до угла 45° . При дальнейшем увеличении угла в плане уменьшение вертикальной составляющей чрезвычайно незначительное.

На рис. 97 показан фрезер с угловым лезвием. На рис. 98 и 99 представлены результаты опытов, проведенных с ним. Для опытов нами были выбраны сталь 1035 и чугун № 2 как два совершенно различных по свойствам металла.

На рис. 98 и 99 прямые проведены по данным опытов с фрезером без углового лезвия по соответствующим металлам, а точки нанесены по опытам с угловым лезвием. Мы видим, что точки хорошо ложатся на прямые, т. е. что влияние углового лезвия на силу и мощность совершенно отсутствует для случая угла $\varphi = 45^\circ$. Угол наклона фасочного углового лезвия был взят 45° , как наиболее часто встречающийся в производстве.

Полученное отсутствие влияния углового лезвия на нагрузку фрезера казалось бы противоречит логике, т. к. при наличии углового лезвия длина режущей кромки получается больше, чем без такового и казалось бы должно возрастать давление резания. Но здесь необходимо принять во внимание более свободное отделение стружки, кроме того передний угол на угловом лезвии в плоскости, нормальной к его режущей кромке, больше, нежели на лезвии цилиндрической части фрезера. Нетрудно вычислить его действительную величину, если отождествить зуб фрезера с токарным резцом, имеющим угол в плане 45° и воспользоваться для вычисления выводами проф. Семенченко.⁹⁾

Назовем γ_N — передний угол в плоскости нормальной к угловому лезвию.

γ_1 — передний угол в плоскости нормальной к торцу фрезера.

γ_2 — передний угол в плоскости перпендикулярной оси фрезера

Все эти углы мы получим, если зуб фрезера поставим в такое положение, когда вершина лезвия (точка пересечения углового и торцевого лезвий) будет находиться в одной горизонтальной плоскости с осью фрезера.

Из непосредственного измерения мы имеем

$$\gamma_1 = 15^\circ$$

$$\gamma_2 = 8^\circ$$

Отсюда можно найти γ_N

$$\operatorname{tng} \gamma_N = \operatorname{tng} \gamma_1 \cdot \cos \varphi + \operatorname{tng} \gamma_2 \cdot \sin \varphi = 0,289$$

$$\gamma_N = 16^\circ.$$

Таким образом на угловом лезвии для $\varphi = 45^\circ$ передний угол превышает в два раза передний угол на лезвии цилиндрической части фрезера.

Мы считаем, что, так как опыты нами были проведены и для достаточно вязкого металла (сталь 1035), и для металла хрупкого (чугун № 2), и

для всех других металлов, мы будем иметь, может быть, с несущественными отклонениями, тот же результат. Значения A_w для углового лезвия подсчитывались по среднему диаметру при данной глубине фрезерования.

Заключение.

Всего в данной работе нами было проведено в общей сложности (считая опыты для отсчета нулевых показаний аппаратуры, но не считая тарировочных) 2250 опытов, из них с цилиндрическим фрезером 781, с торцевым 1479. Все без исключения опыты приняты во внимание при выводе соответствующих зависимостей.

Все опыты подтвердили на более широком ряде материалов наши прошлые выводы.

На основе этого можно рекомендовать:

1. Для подсчетов мощностей и сил при работе цилиндрического фрезера пользоваться уравнениями 3, 12, 13 и таблицами 10 и 11.
2. Для подсчетов мощностей и сил при работе торцевого фрезера пользоваться уравнениями 8,9,10,23,24, 25 и табл. 19 и 20.
3. Для приближенного определения динамических характеристик обрабатываемого материала по его твердости пользоваться уравнениями 14—22 и 26—29.

Литература, на которую имеются ссылки.

1. Розенберг и Суднишников.—Теория работы цилиндрической фрезы со спиральным зубом. Вестник металлопромышленности, 1933 год, № 4.
2. Розенберг. Работа цилиндрической фрезы. Орга-информация, 1935 г. № 12. Известия Томского Индустриального ин-та.
3. Розенберг—Динамика лобового фрезерования. Известия Томского индустриального ин-та, 1937 г. том 56, выпуск 1.
Розенберг.—Динамика торцевого фрезерования. Труды первой Ленинградской областной конференции по резанию металлов. 1937 г.
4. Розенберг.—Работа лобового фрезера. Орга-информация, 1936 год. № 7.
4. Stock—Fräserhandbuch.
5. Ларин.—Динамика торцевого фрезерования. Орга-информация, 1936 год. № 12.
6. Проф. Резников.—Теория резания металлов.
7. Рывкин.—Вопросы резания при торцевом фрезеровании.
8. Schlesinger: V.D.I. 1932 г. № 53.
9. Проф. Семенченко.—Режущий инструмент.