

Работа цилиндрической фрезы.

(Экспериментальное исследование).

Несмотря на значительное количество работ, проведенных по теоретическому и экспериментальному исследованию процесса фрезерования, вопрос о влиянии факторов резания на затрачиваемую мощность нельзя считать окончательно выясненным. Некоторые исследователи ¹⁾ пытались за зависимости, полученные для процесса токарной обработки, перенести в процесс фрезерования, в большинстве же случаев вопрос подвергался экспериментальному исследованию.

Общая тенденция влияния основных факторов резания (подачи, глубины резанья, числа зубцов) на затрачиваемую мощность при фрезеровании была установлена еще работами de Leuw ²⁾ и Reindl ³⁾, после чего работы Eirey - Oxford ⁴⁾, Sawin ⁵⁾, Beckh ⁶⁾, Salomon ⁷⁾, Bahlecke ⁸⁾, Eisele ⁹⁾, Schlesinger ¹⁰⁾, Stoewer ¹¹⁾, Беспрозованный ¹²⁾, Boston and Kraus ¹³⁾, Brödner ¹⁴⁾, Schröder ¹⁵⁾, Мичиганского университета ¹⁶⁾ и другие подтвердили и в большей или меньшей степени уточнили зависимость мощности при фрезеровании от факторов резанья, не изменяя вскрытой первыми опытами de Leuw и Reidl общей тенденции увеличения производительности с переходом к более крупным стружкам. В противоречии с этими многочисленными и капитальными работами находится лишь Гувернер ¹⁷⁾, который в своей теории „рационального фрезерования“, кстати сказать усиленно рекомендованной в предисловии профессором Панкиным, возвращает нас на 35 лет назад к воззрениям Fischer'a ¹⁸⁾ трактуя о прямой пропорциональности между мощностью с одной стороны и подачей и глубиной фрезерования с другой, что, конечно, не может восприниматься иначе, как печальное недоразумение.

Точного выражения влияния всех факторов резанья на потребляемую мощность мы до сего времени не имеем, и результаты всех перечисленных выше работ дают значительные расхождения.

Наименее выясненным является вопрос влияния угла подъема спирали зуба фрезы на мощность фрезерования, и здесь мы встречаемся с совершенно противоположными взглядами. Bahlecke ⁸⁾ Eisele ⁹⁾, Schlesinger ¹⁰⁾, Boston and Kraus ¹³⁾ не затрагивают этого вопроса; Brödner ¹⁴⁾, опыты Мичиганского университета ¹⁶⁾ Сафонов и Новиков ²³⁾ указывают на отсутствие влияния подъема спирали зуба на потребляемую мощность; Stoewer ¹¹⁾ указывает на повышение потребляемой мощности с уменьшением угла подъема (с увеличением угла наклона) спирали; Beckh ⁶⁾, Sawin ⁵⁾, Соколов ²⁰⁾, Резников ¹⁾, Кривоухов ²¹⁾, Исаев ²²⁾ утверждают обратное влияние.

Автор предлагаемой работы опубликовал в 1933 году теорию работы цилиндрической фрезы со спиральным зубом ²⁴⁾, в которой в общем виде была дана связь между всеми факторами резанья при фрезеровании; кроме того была вскрыта ошибка целого ряда исследователей при вычислении толщины стружки на спиральном зубе фрезы, повлекшая за собой неправильную оценку влияния угла подъема спирали на сечение стружки, окружную силу и потребляемую мощность при фрезеровании. Теория работы фрезы со спиральным зубом была дана в элементарном виде без учета

некоторых побочных факторов (как то: силы трения на передней грани спирального зуба; явления подпиливания стружки режущей кромкой зуба, как результат наличия составляющей скорости в направлении кромки зуба; изменения фактического угла резанья), так как эти факторы не могли быть учтены теоретически, и влияние их может быть определено лишь экспериментом. Предлагаемая работа имела целью проверить экспериментально опубликованную автором теорию, а также найти характеристики различных обрабатываемых материалов, входящих в уравнение мощности при фрезеровании.

Метод исследования и применяемая аппаратура.

При исследовании процесса фрезерования значительное количество работ проведено с применением измерительных столов, регистрирующих силу подачи P_h , силу вертикального давления P_v , и осевую силу P_a , что

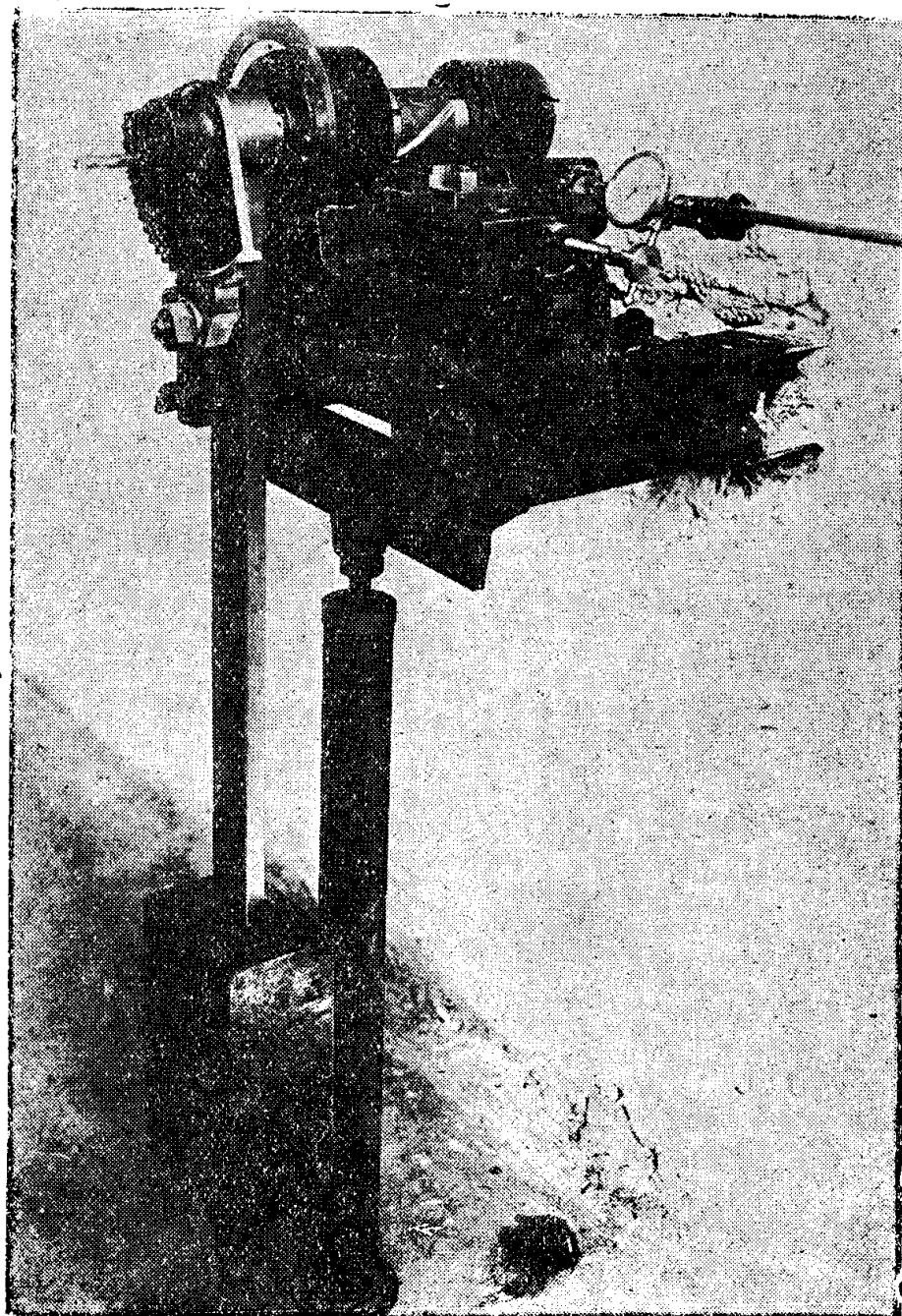


Рис. 1

не дает возможности перейти к затрате мощности, так как точной связи между окружной силой на фрезе и указанными выше мы до сего времени не знаем. Таким методом проведены работы Eisele⁹⁾, Brödnier¹⁴⁾, Beckh⁶⁾, Беспрозванного¹²⁾; последняя работа сопровождалась определением к. п. д. станка путем торможения для возможности вычисления эффективной мощности на шпинделе по мощности, затрачиваемой мотором, что вряд ли может дать точные результаты в силу непостоянства потерь в станке. Bahleske⁸⁾ пользовался только методом торможения, причем даже не учитывал добавочных сопротивлений при нагрузке станка, Boston and Kraus¹³⁾ применили специальный маятниковый динамометр, определяющий затрату работы на срезание одной стружки; к сожалению, ничего не известно о тарировке этого динамометра. Sawin, Salomon²⁵⁾ применяли специальные динамометры для регистрации крутящих моментов на шпинделе станка, причем динамометр Salomon'a был практически безинерционным, что давало возможность регистрировать изменение сил и моментов, происходящих в короткие промежутки времени. В большинстве случаев измерительная аппаратура была основана на гидравлическом принципе, либо на принципе упругих деформаций эталона, что вносило свои искажения в результаты опытов в силу наличия инерционности регистрирующих приборов.

Подробное описание аппаратуры дают Eisele²⁶⁾, Kurrein²⁷⁾ Schlesinger²⁸⁾.

Мы придаем исключительное значение методике эксперимента и применяемой аппаратуре, т. к. это в значительной степени определяет надежность полученных результатов. К сожалению, во многих исследованиях либо совершенно отсутствует описание применяемой аппаратуры, либо в большинстве случаев ничего не говорится о тарировке ее, что не дает возможности судить о точности полученных результатов.

Мы при производстве опытов в лаборатории резанья металлов Томского Индустриального Института пользовались двумя методами измерения интересующих нас в процессе фрезерования величин.

Был изготовлен специальный маятниковый динамометр, при помощи которого можно было с высокой степенью точности определять затрату работы на срезание зубом фрезы одной стружки. Схема и фотография динамометра представлены на рис. 1 и 2. На шпиндель динамометра, смонтированный в корпусе его на шариковых подшипниках, укреплялась фреза с одним зубом (1). Для надежности крепления шейка шпинделя и отверстия однозубых фрез были устроены коническими. На конусе фреза затягивалась гайкой и от проворачивания удерживалась шпонкой. Под фрезой на направляющих прибора помещался столик, в котором при помощи специального клинового зажима крепился образец. Столик к направляющим крепился двумя болтами, после того, как производилась подача его при помощи специальных ходовых винтов (4) с отсчетом по индикатору (3) с точностью до

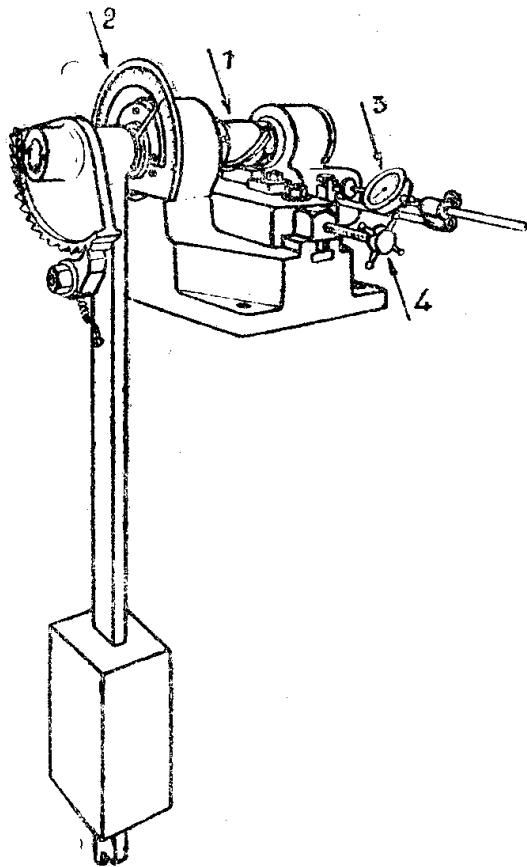


Рис. 2

0,01 мм. После производства подачи и закрепления столика, рычаг с грузом поднимался до определенной высоты, фиксируемой специальной собачкой и через храповик сцеплялся со шпинделем и фрезой. Будучи отцеплен от собачки, рычаг с грузом падал, вращал фрезу, срезая одну стружку и поднимался после этого за счет оставшегося запаса энергии до какой-то высоты, которая фиксировалась автоматически стрелкой на лимбе (2). Разность первоначального запаса работы маятника и остатка ее затрачивалась на срезание одной стружки определенных, заранее известных размеров и могла быть легко вычислена.

Тарировка маятника производилась следующим образом. На рис. 3 представлена схема работы маятника. Первоначальное положение центра тяжести рычага и груза h_0 , запас работы при этом $Q h_0$. Конечная точка подъема центра тяжести h_1 , остаток работы при этом $Q h_1$.

Затрата работы на срезание одной стружки, или что тоже, работа одного зуба, которую мы в дальнейшем будем обозначать A_z :

$$A_z = Q (h_0 - h_1).$$

Если расстояние от оси вращения до центра тяжести вращающейся системы обозначить через R , то

$$A_z = Q \cdot R [\sin \alpha_0 - \sin (\alpha_1 - 90^\circ)], \text{ при } \alpha_1 > 90^\circ$$

и

$$A_z = Q \cdot R [\sin \alpha_0 + \cos \alpha_1] \text{ при } \alpha_1 < 90^\circ.$$

Таким образом, для нахождения A_z нужно знать $Q R$ и фиксировать во время опытов углы α_0 и α_1 .

$Q R$ ничто иное, как момент груза и рычага относительно оси вращения и был нами определен при помощи десятичных весов.

Угол α_0 нами был определен как угол, на который поднимался маятник при свободном падении его без срезания стружки, при этом вредные сопротивления холостого хода сами собой исключались. Угол α_1 автоматически фиксировался стрелкой на лимбе после срезания стружки. Угол α_0 в течение 1½ лет работы с прибором колебался не более, чем на $\pm 0,15^\circ$. Определялся он регулярно перед каждой серией опытов.

При работе резанья на шпинделе прибора возникали добавочные силы, в случае прямозубой фрезы радиальные, в случае спиральной, кроме того еще и осевые, вызывающие добавочные вредные сопротивления в подшипниках. Эти добавочные вредные сопротивления были нами определены путем специальной тарировки.

Для определения добавочных вредных сопротивлений, возникающих под влиянием радиальных сил, на шпиндель прибора на место фрезы был посажен шариковый подшипник (3), через который шпинделю сообщались различные нагрузки, при этом изменением высоты подъема маятника опре-

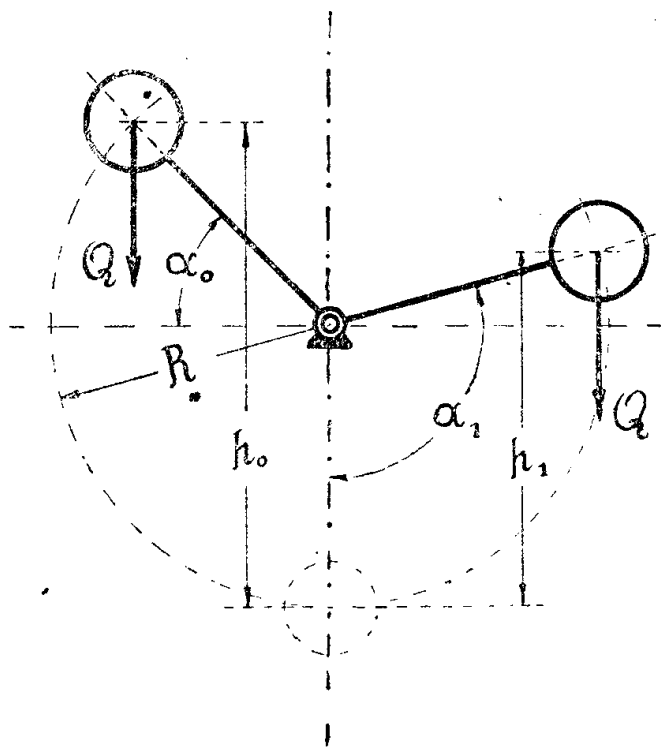


Рис. 3

делялась работа, идущая на преодоление вредных сопротивлений в трех подшипниках (см. рис. 4). В дальнейшем было принято, что работа вредных сопротивлений прибора равна $\frac{2}{3}$ от определенной таким образом работы (хотя можно было бы ее приравнять $\frac{1}{2}$ работы вредных сопротивлений при тарировке,

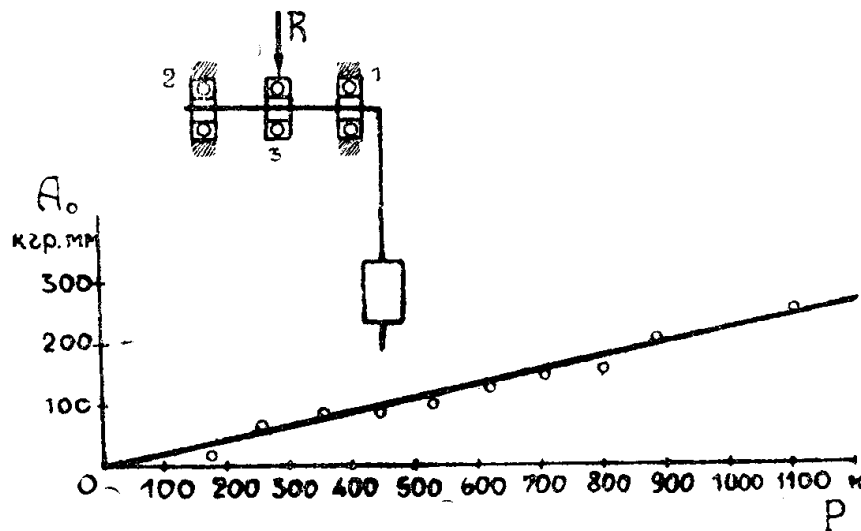


Рис. 4

т. к. сила, действующая на подшипник 3 равна сумме сил, действующих на подшипники 1 и 2, являясь их равнодействующей и вредные сопротивления в подшипнике 3 должны составлять больше $\frac{1}{3}$ вредных сопротивлений во всех трех подшипниках). По результатам опыта построена диаграмма рис. 4, где по оси ординат отложена работа вредных сопротивлений за одно качание маятника A_0 в

кг·мм, по оси абсцисс окружная сила на фрезе, т. е. сила резанья P . Для перехода от силы R^*) к силе P было принято, что радиальная, составляющая при фрезеровании равна половине окружной силы резанья, т. е.

$$P_r = 0,5 \cdot P$$

хотя Куррейн дает, что $P_r = (0,3 - 0,4) \cdot P^{27}$.

Таким образом:

$$R = \sqrt{P^2 + P_r^2} = \sqrt{P^2 + (0,5 P)^2} = 1,12 P.$$

$$P = 0,893 R.$$

По рис. 4 можно найти:

$$A_0 = 0,225 P.$$

Если мы работу вредных сопротивлений отнесем к окружности фрезы, то получим добавочную силу на зубе фрезы $P_{доб.}$, искажающую показания прибора при опытах в результате наличия вредных сопротивлений в приборе. Можно написать:

$$A_0 = P_{доб.} \cdot \frac{D}{2} (\alpha_0 + \alpha_1)$$

где: D — диаметр фрезы.

α_0 — угол подъема маятника до его качания.

α_1 — угол подъема маятника после качания.

$\alpha_0 + \alpha_1$ — весь угол, проходимый маятником при одном качании. В нашем случае $\alpha_0 = 145^\circ = \text{const}$; α_1 при тарировке уменьшалось с увеличением силы R ; при $R = 0$, $\alpha_1 = 144^\circ$; при $R = 1250$ кг. $\alpha_1 = 142^\circ$.

*) Здесь R — равнодействующая сил на шпindelе.

Для подсчетов принято

$$(\alpha_0 + \alpha_1) = 145 + 142 = 287^\circ.$$

Таким образом:

$$A_0 = P_{\text{доб.}} \cdot \frac{D}{2} (\alpha_0 + \alpha_1) = P_{\text{доб.}} \cdot \frac{D}{2} \cdot \frac{2\pi}{360} \cdot 287$$

Отсюда

$$P_{\text{доб.}} = 0,4 \frac{A_0}{D}.$$

Но по рис. 4

$$A_0 = 0,225 \cdot P.$$

При подстановке получаем

$$P_{\text{доб.}} = 0,09 \frac{P}{D},$$

т. е. добавочная сила на фрезе (как результат вредных сопротивлений прибора) будет максимальной при минимальном диаметре фрезы. В наших опытах с маятниковым диаметром $D_{\min} = 60$ мм и для этого случая

$$P_{\text{доб.}} = 0,09 \frac{P}{60} = 0,0015 \cdot P.$$

таково же соотношение A_0 кг.р.мм будет и между работой резанья и работой вредных сопротивлений. Иначе говоря, вредные сопротивления прибора искажают его показания лишь на 0,15%, что конечно можно совершенно не принимать во внимание.

Таким же путем было произведено определение вредных сопротивлений прибора, возникающих под влиянием осевых сил (см. рис. 5).

Подшипник 3 в этом случае был посажен на конец шпинделя и через него давалась шпинделю при тарировке осевая нагрузка.

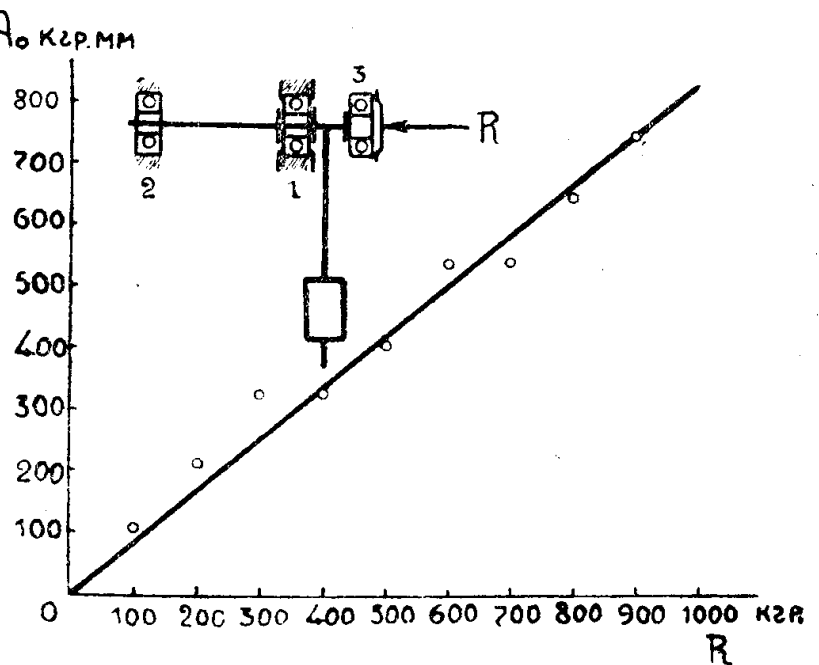


Рис. 5

При этом мы получили при $R = 900$ кг, $\alpha_1 = 138^\circ$

$$A_0 = P'_{\text{доб.}} \cdot \frac{D}{2} \cdot \frac{2\pi}{360} \cdot 283$$

$$P'_{\text{доб.}} = 0,405 \cdot \frac{A_0}{D}.$$

По рис. 5

$$A_0 = 0,83 R.$$

Кроме того,

$$R = \frac{P}{\operatorname{tg} \beta}.$$

где β — угол подъема спирали зуба фрезы.

Отсюда

$$P'_{\text{доб.}} = 0,405 \cdot 0,83 \cdot \frac{P}{D \operatorname{tg} \beta} = \frac{0,336 P}{D \operatorname{tg} \beta}.$$

В опытах $\beta_{\min} = 45^\circ$; $D_{\min} = 60$ мм и максимальное значение $P'_{\text{доб.}}$ будет:

$$P'_{\text{доб.}} = \frac{0,336}{60} \cdot P = 0,0056 P.$$

Т. е. сила и работа вредных сопротивлений искажает показания опыта лишь на 0,56%, что также нет необходимости принимать во внимание.

Таким образом мы убедились в достаточной точности нашего прибора.

На маятниковом динамометре мы могли применять фрезы с диаметрами от 55 мм до 100 мм. Ширина фрезерования могла применяться при опытах в пределах до 25 мм и определялась шириной образца, закрепляемого в столике. После закрепления образца в столике, столик устанавливался на стол фрезерного станка, где путем фрезеровки образцу придавалась строго горизонтальная поверхность и создавалась при том же определенной глубине фрезерования t для работы на динамометре. Длина образца равнялась 65 мм, что давало возможность при одной глубине фрезерования t и при различных подачах получить без перестановки образца 150—300 опытов. Глубина фрезерования точно определялась индикатором.

Маятник динамометра располагал запасом работы в 38,57 килограммометра и это давало возможность снимать стружки значительной величины. Во время опытов мы довели подачу на 1 зуб до 1 мм. В работе маятниковый динамометр показал хорошие качества, особенно при опытах по чугуноу, что можно видеть из приведенного примерного протокола (см. табл. 1).

При работе по стали мы имели несколько меньшее постоянство отсчетов (при $S_z = \text{const}$; $t = \text{const}$; $b = \text{const}$), видимо в силу того, что при снятии стружки с вязкого металла в месте выхода зуба из-под стружки образовывались неровности и надрывы, влияющие на расход работы при срезании следующей стружки.

Протокол № 54, 29/VI-34 г.

Т а б л и ц а 1.

Обрабатываемый материал: Чугун $H = 134$.

Фреза углеродистой стали. Заточка 2/VI-34 г.

$$D = 60,5 \text{ мм. } \gamma = 0^\circ. \beta = 45^\circ; \delta = 5^\circ$$

Ширина фрезерования $b = 25$ мм. Глубина фрезерования $t = 7$ мм. $\alpha_0 = 144^\circ$.

№№ опыта	S_z мм	α_0	A_z кг мм	A_z среднее	Примечание
1223	0,05	134,8	2222	2400	S_z — подача на 1 зуб A_z — работа на срезание одной стружки.
1224		134,9	2196		
1225		133,6	2500		
1226		133,6	2500		
1227		133,5	2565		

№№ опыта	S_z мм	α_0	A_z кг мм	A_z среднее	Примечание
1228 1229 1230 1231 1232 1233	0,1	128,5 128,6 128,9 128,5 128,0 128,7	3970 3940 3860 3970 4120 3920	3960	
1234 1235 1236 1237 1238	0,2	121,0 121,2 120,7 121,2 121,1	6260 6200 6350 6200 6230	6250	
1239 1240 1241 1242 1243	0,3	114,5 115,0 115,6 115,0 115,7	8400 8230 8030 8230 8000	8180	
1244 1245 1246 1247	0,4	110,5 110,6 110,5 110,0	9780 9740 9780 9950	9810	
1248 1249 1250 1251	0,5	105,3 105,0 104,0 105,0	11620 11720 11750 11720	11710	
1252 1253 1254	0,6	100,6 100,9 101,0	13320 13210 13170	13230	
1255 1256 1257	0,8	92,0 92,2 92,1	16500 16425 16463	16463	Контрольн. при $S_z = 0,1$ мм дали $128,8^\circ = 3890$ кг мм

При резании чугуна линия выхода зуба из-под стружки получалась совершенно ровной. Поэтому при обработке чугуна считали необходимым при постоянных условиях проделывать не менее трех опытов, при обработке стали не менее пяти.

Однозубые фрезы, применяемые при работе с динамометром, имели размеры и профиль зуба согласно табл. 2.

Таблица № 2

№	Диаметр фрезы D мм $\varnothing$	Материал фрезы	Угол под'ема спирали β	Угол поднутрения γ	Угол δ задней заточки
1	60	Углеродист. сталь	90°	0°	5—7°
2	60	" "	75°	0°	5—7°
3	60	" "	65°	0°	5—7°
4	60	" "	45°	0°	5—7°
5	79	Быстрорежущая сталь	90°	0°—5°—10°— 15°	19°—14°—9° —4°

Фреза 5, изображенная на рис. 6, в середине была выполнена со вставным зубом, при чем четыре прореза в теле фрезы были сделаны с различными наклонами к радиальной плоскости, так что переставляя зуб из одного прореза фрезы в другой, мы меняли при этом угол поднутрения. Это давало нам возможность опыты с различными углами поднутрения от

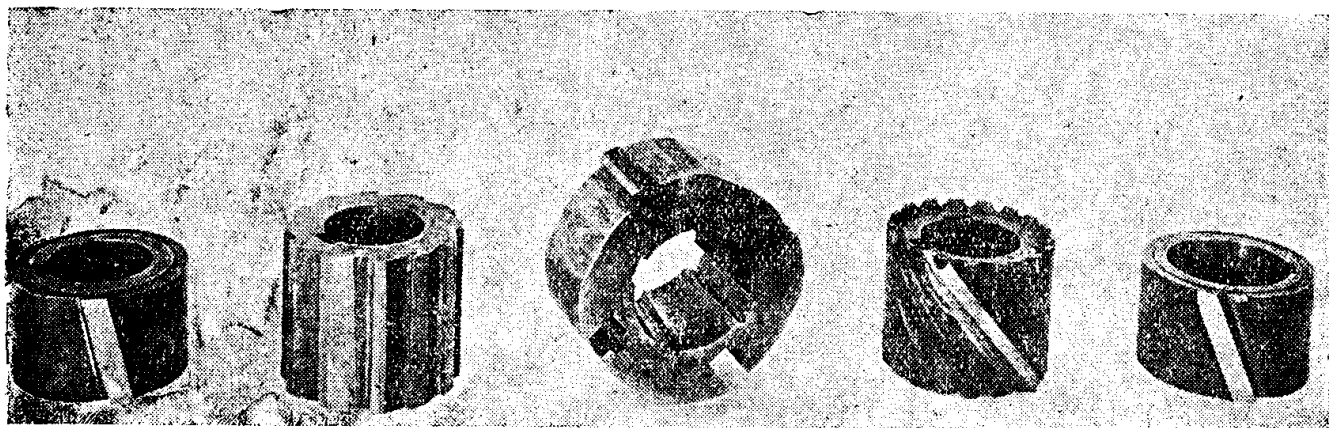


Рис. 6

$\gamma = 0^\circ$ до $\gamma = 15^\circ$ проводить одним и тем же зубом, имеющим одно и то же состояние режущего лезвия и тем самым точно выявлять влияние угла поднутрения на расход работы. Мы считали, что состояние лезвия практически не изменяется на протяжении 200—250 опытов, необходимых для исследования, при одной глубине фрезерования и различных подачах с четырьмя углами поднутрения, что и было подтверждено специальными контрольными опытами.

При перестановке зуба в другой прорез, неизбежно изменялся угол задней заточки в пределах от $\delta = 19^\circ$ (при $\gamma = 0$) до $\delta = 4^\circ$ (при $\gamma = 15^\circ$). Специально проведенной серией опытов было установлено, что изменение угла задней заточки δ в пределах от 4° до 19° при всех прочих постоянных условиях на расход работы совершенно не влияет.

Применение маятникового динамометра позволило нам с небольшим расходом материала провести большое количество опытов высокой точности. Кроме того при работе с динамометром мы совершенно не имели влияния на результаты опытов нежелательных факторов, неизбежно сопутствующих работе на фрезерном станке нормальными фрезами, а именно биения фрезы и различной степени остроты зубьев фрезы.

Параллельно с опытами на маятниковом динамометре нами было проведено большое количество опытов на фрезерном станке Тульского завода, имеющем 12 скоростей шпинделя и 12 подач от 20 до 700 мм в минуту. Станок был оснащен специальным самозаписывающим гидравлическим динамометром конструкции автора, изготовленным в лаборатории резанья металлов Томского индустриального института и встроенным в коробку скоростей станка. Динамометр регистрировал крутящие моменты на шпинделе станка во время работы. Принцип действия динамометра понятен из рис. 7.

На вал, приводящий в движение шпиндель фрезерного станка, насажена на шпонке шестерня 3, которая, вращаясь вместе с валом, через шестерню 4, вращает шестерню 5, связанную (специальной муфтой, не показанной на схеме) со шпинделем: промежуточная шестерня 4 вращается на шарикоподшипниках в двух серьгах 6, которые в свою очередь посажены на шариковых подшипниках на вал, на котором сидит на шпонке шестерня 3.

Серьги 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 опи-

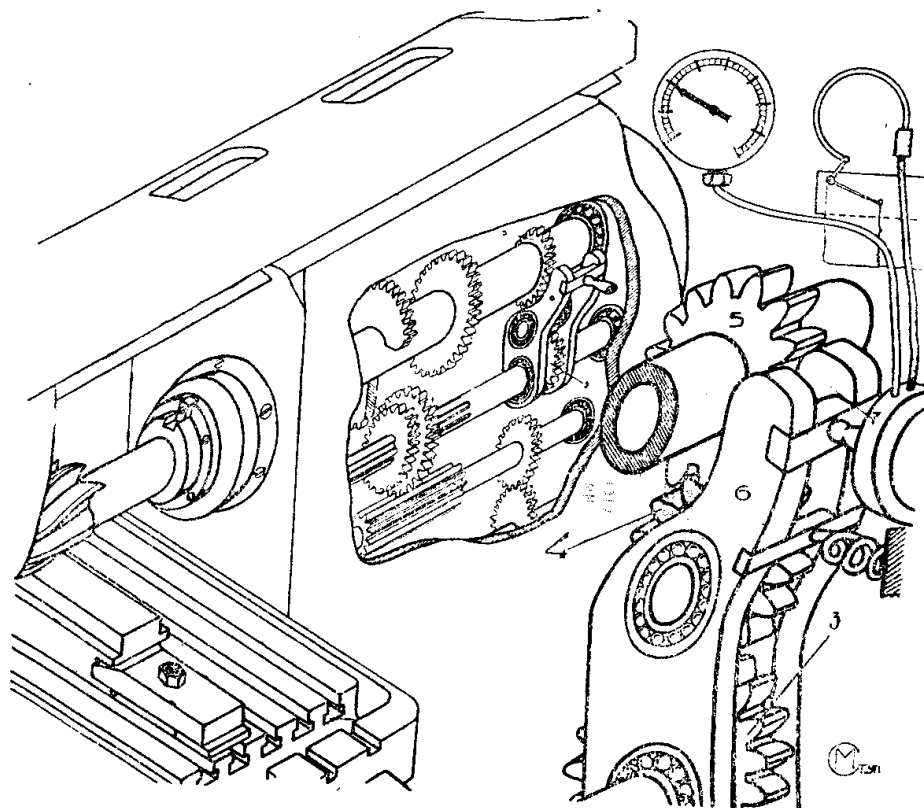


Рис. 7

раются через специальный штырь на гидравлическую месседозу 7, укрепленную на боковой стенке станка. На рис. 8 на правой стенке станка видна закрепленная месседоза (показана стрелкой). Так как жидкость в месседозе практически не сжимаема, то серьги 6 почти не перемещаются; в то же время давление на поршень месседозы будет тем больше, чем больше крутящий момент на шпинделе, который может быть таким образом зарегистрирован самопишущим манометром на движущейся ленте бумаги.

Специальная пружина предусмотрена для притягивания серег 6 к месседозе 7, что создает первоначальное давление и уничтожает всякие люфты и дрожания.

Тарировка динамометра производилась тормазом „Прони“. Тарировочные кривые показаны на рис. 9. На этом же рисунке показаны точки непосредственной (независимой) тарировки одной месседозы 7 вне динамометра. Точки этой тарировки точно легли на тарировочную кривую динамометра в станке, что указывает на незаметно малые потери в подшипниках шпинделя, что вполне естественно, т. к. шпиндель станка монтирован на подшипниках с коническими роликами. На рис. 10 показано перемещение поршня месседозы при различных нагрузках. Можно видеть, что при максимальном крутящем моменте на шпинделе в 40000 кг мм перемещение поршня месседозы составляет лишь 0,16 мм, перемещение же шестерни 4 динамометра при этом составляет лишь 0,1 мм. Если принять во внимание, что имеется всегда первоначальный натяг, обеспечиваемый пружиной, и что во время работы при точно шлифованных фрезах нагрузка

никогда не падает от максимума до нуля, можно понять, почему динамометр дает хорошие результаты в работе. Тарировка нами производилась несколько раз через более или менее продолжительные промежутки времени и всегда мы получаем одну и ту же тарировочную кривую. Установленный перед работой нуль динамометра, который примерно равнялся у нас 25% от максимальной нагрузки, никогда во время работы не сбивался, что также говорит о высоких качествах динамометра.

Для учета добавочных вредных сопротивлений в опорах оправки и шпинделя во время работы, возникающих под влиянием сил на фрезе, произведена была дополнительная тарировка, результаты которой в отношении радиальных сил представлены на рис. 11. Осевые силы, никаких добавочных сопротивлений в опорах шпинделя не вызывали, что также было испытано. Поэтому можно полагать, что добавочные моменты $M_{доб.}$ по рис. 11 возникают не в подшипниках шпинделя (конических роликовых), а в подшипниках скольжения внешнего конца оправки фрезы. Таким образом, от этих добавочных сопротивлений не представляется возможным освободиться даже

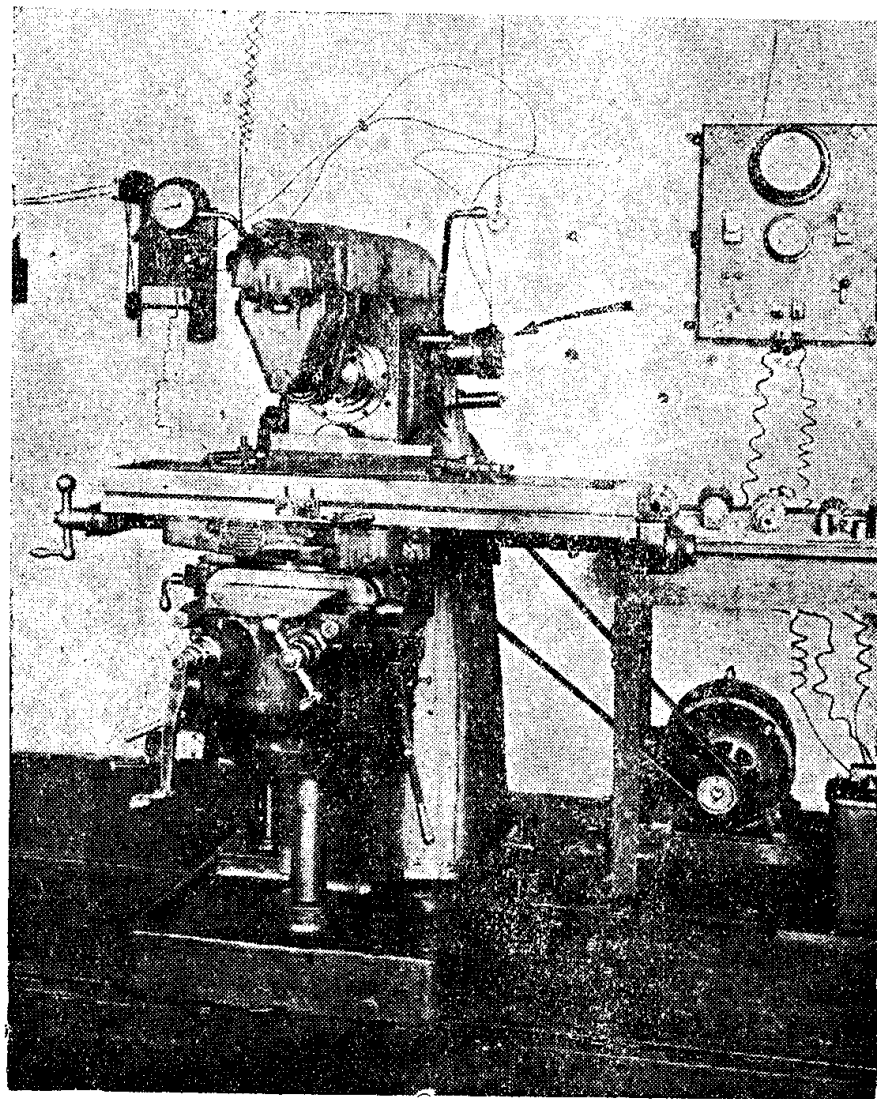


Рис. 8

при новейших типах электрических динамометров. $M_{доб.}$ нами вычитались из полученных при опытах моментов, благодаря чему мы получали чистый момент резанья.

Через динамометр мы могли получать на шпинделе 6 различных чисел оборотов. При помощи специального блокировочного устройства можно было выключить динамометр и получить при этом на шпинделе 12 различных чисел оборотов. Станок, таким образом, всегда был готов к работе без установки каких бы то ни было дополнительных приспособлений, что создавало благоприятные условия для проведения опытов.

Наш динамометр не мог, конечно, в силу своей „инерционности“, абсолютно точно регистрировать изменения крутящего момента на шпинделе, происходящие в очень короткие промежутки времени, поэтому в работе мы выбирали всегда такую ширину фрезерования b , которая была связана

с диаметром фрезы D , углом подъема спирали β , с шагом спирали зуба фрезы H и с числом зубцов Z зависимостью:

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

где c — любое целое число.

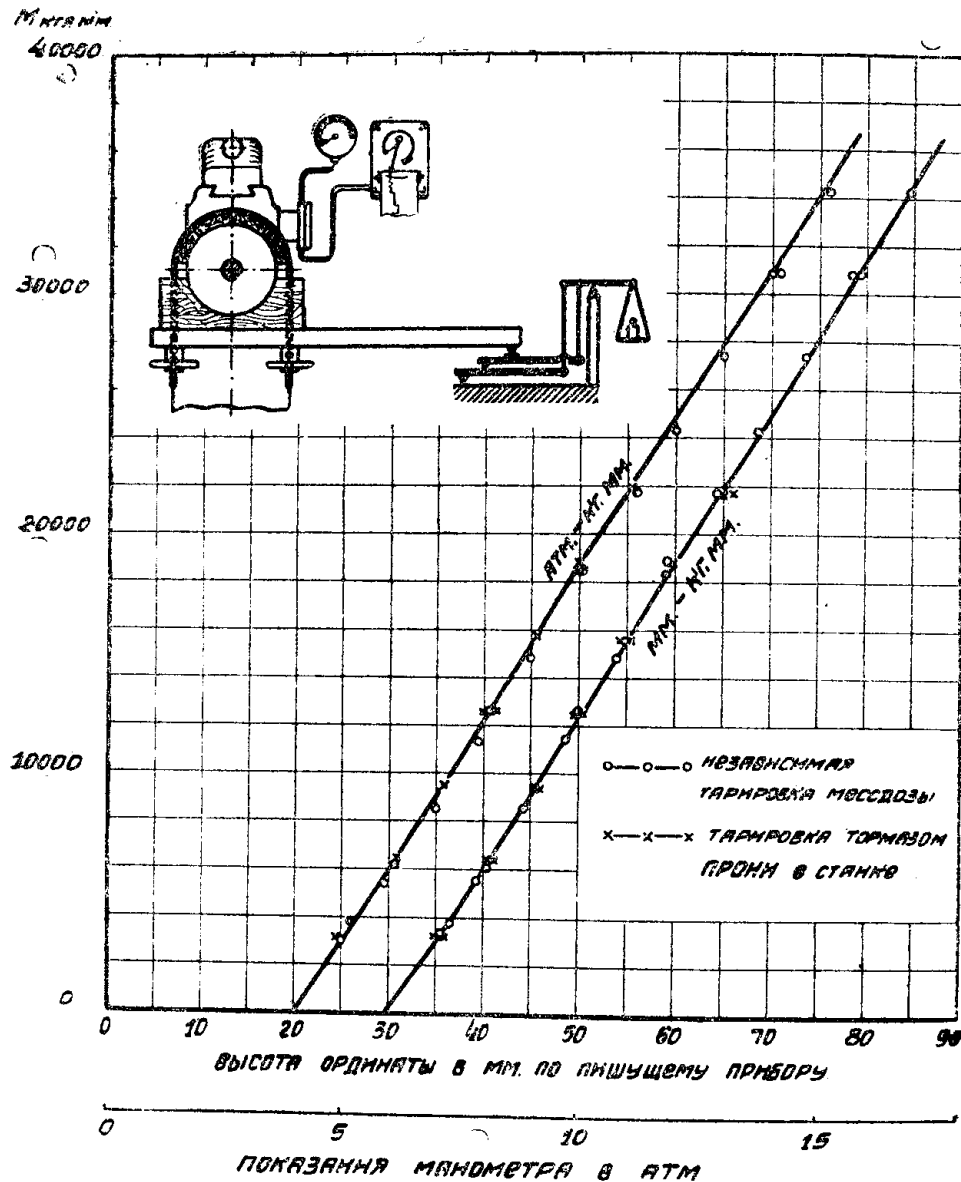


Рис. 9

При этой ширине фрезерования суммарное сечение стружки на всех одновременно работающих зубьях фрезы постоянно, как по величине, так и по форме, суммарная окружная сила и крутящий момент на фрезе также являются величиной постоянной при заданном режиме и если и имеют некоторые колебания в силу неизбежного биения фрезы, то эти колебания происходят один раз за один оборот фрезы и могут быть точно зарегистрированы динамометром²⁴). На рис. 12 показаны две записи динамометра, одна при $b = \frac{H}{Z}$, другая при $b < \frac{H}{Z}$. На второй ясно видны отмет-

метра, одна при $b = \frac{H}{Z}$, другая при $b < \frac{H}{Z}$. На второй ясно видны отмет-

ки, соответствующие каждому зубу фрезы, что также говорит о чувствительности динамометра.

Фрезы, применяемые при опытах на станке, показаны на рис. 13. Они

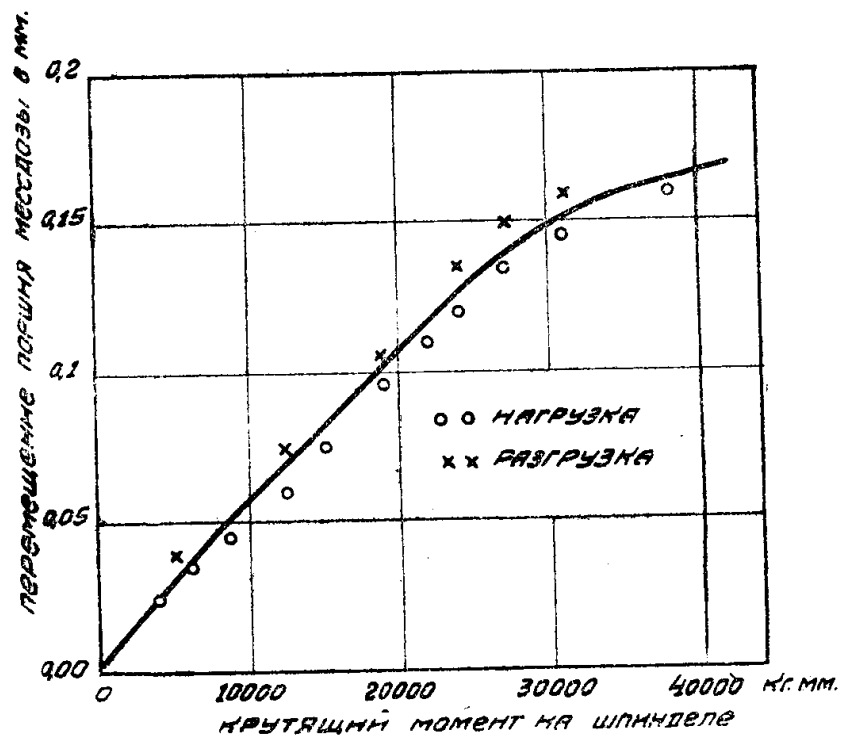


Рис. 10.

затачивались нами не снимаясь с оправок, для чего оправка с фрезой ставилась при помощи специального приспособления на центра шлифо-

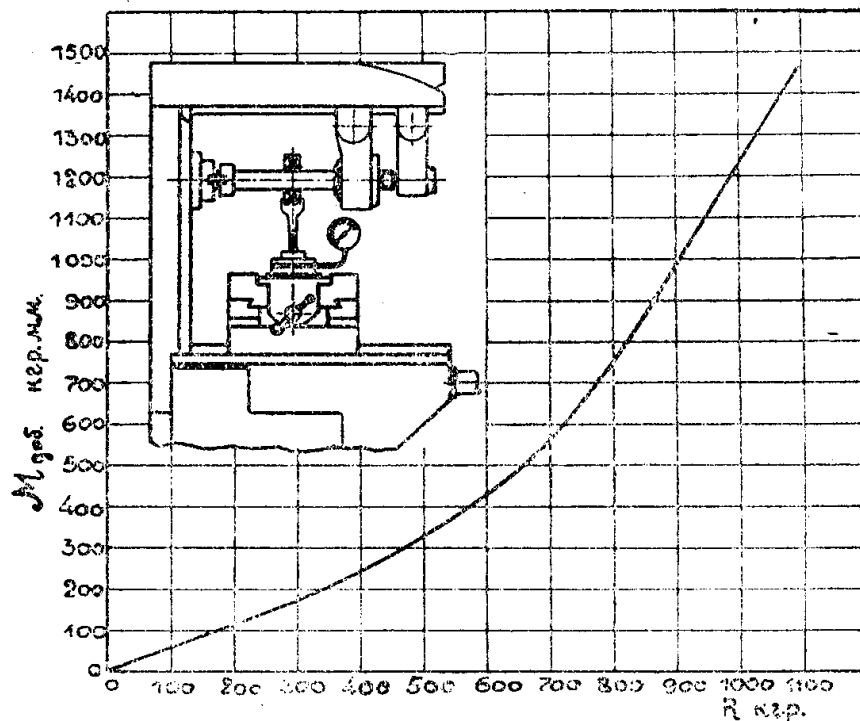


Рис. 11.

вального станка. Таким путем нам удалось точнее затачивать фрезы и держать максимальную эксцентricность (биение) в пределах 0,02 мм.

Методика обработки результатов опытов.

Таким образом, опыты нами проводились двумя, совершенно различными методами: при пользовании маятниковым динамометром определялся расход работы на срезание одной стружки; при работе на фрезерном станке гидравлическим динамометром регистрировался крутящий момент на фрезе. В случае достаточно точного совпадения результатов опытов, проведенных этими двумя различными методами с различной измерительной аппаратурой мы имели полную гарантию точности полученных результатов.

По выведенному нами ранее уравнению мощности при фрезеровании ²⁴):

$$N_e = \frac{2^{k+1}}{K+2} \cdot \frac{\lambda \cdot n^{-k}}{1000 \cdot 4500} \cdot b \cdot s^{k+1} \cdot t^{\frac{k+2}{2}} \cdot Z^{-k} \cdot D^{-\frac{k}{2}} \dots 1$$

Мощность зависит от:

n — числа оборотов фрезы в минуту.

b — ширины фрезерования в мм.

S — подачи в минуту в миллиметрах.

t — глубины фрезерования в мм.

Z — числа зубцов фрезы.

D — диаметр фрезы в мм.

k — характеристики обрабатываемого материала.

λ — характеристики обрабатываемого материала и профиля зуба фрезы.

Кроме того подача на 1 зуб $S_z = \frac{S}{n \cdot z}$

Уравнение 1 было нами выведено при принятии за основу уравнения для удельного давления при фрезеровании по данным Airey—Oxford

$$K = \lambda \cdot S_e^k \dots 2$$

где: S_e — толщина стружки в данной точке зуба в данный момент.

Так как основной целью нашей работы являлась экспериментальная проверка правильности уравнения 1 и нахождение для различных обрабатываемых материалов значений K и λ для уравнения 1, то логический ход работы должен был бы быть таков:

1) Имея фрезы одного и того же диаметра с одним и тем же числом зубцов и профилем зуба, но с различными углами подъема спирали, исследовать влияние угла подъема спирали на затрачиваемую мощность при различных режимах.

2) Имея фрезы одного и того же диаметра, с одним и тем же наклоном спирали и профилем зуба, но с различными числами зубцов, исследовать влияние числа зубцов при различных режимах.

3) Таким же путем изменять диаметр при постоянных прочих условиях и исследовать влияние диаметра.

4) Изменять профиль зуба и т. д. и т. д.

Мы с целью упрощения работы без потери практической точности ее, выбрали иной метод, который станет понятен из некоторых преобразований уравнения 1 и уравнения 3, характеризующего затрату работы на один зуб за один оборот, т. е. на снятие одной стружки ²⁴).

$$A_z = \frac{2^{k+1}}{K+2} \lambda \cdot b \cdot S_z^{k+1} \cdot t^{\frac{k+2}{2}} \cdot D^{-\frac{k}{2}} \dots 3$$

Поделим правую и левую часть уравнения на объем стружки, снимаемой

На этих материалах нами было проведено 3500 опытов. На станке производились опыты на всех указанных материалах, на маятниковом дина-

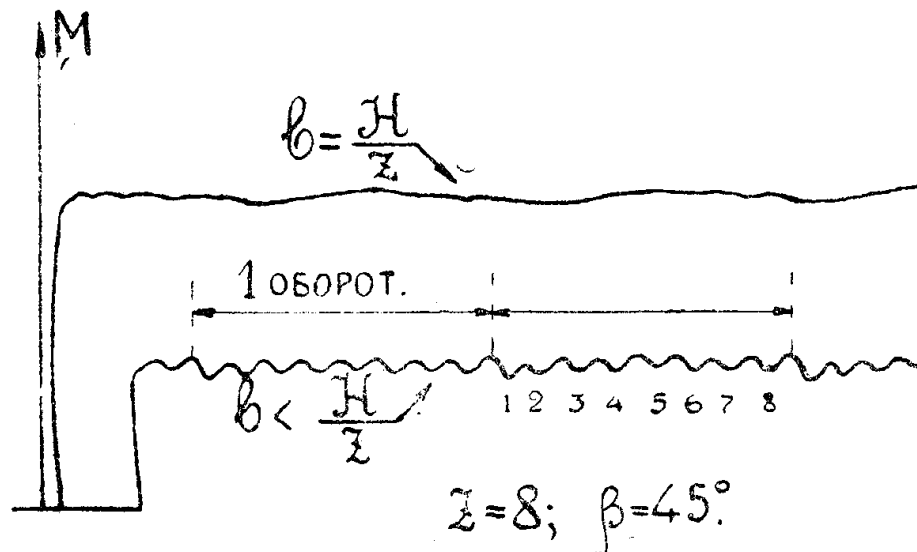


Рис. 12.

мометре из этих материалов были испытаны: чугун $H=140$; сталь средней твердости и хромистая сталь. Условия работы при опытах изменялись

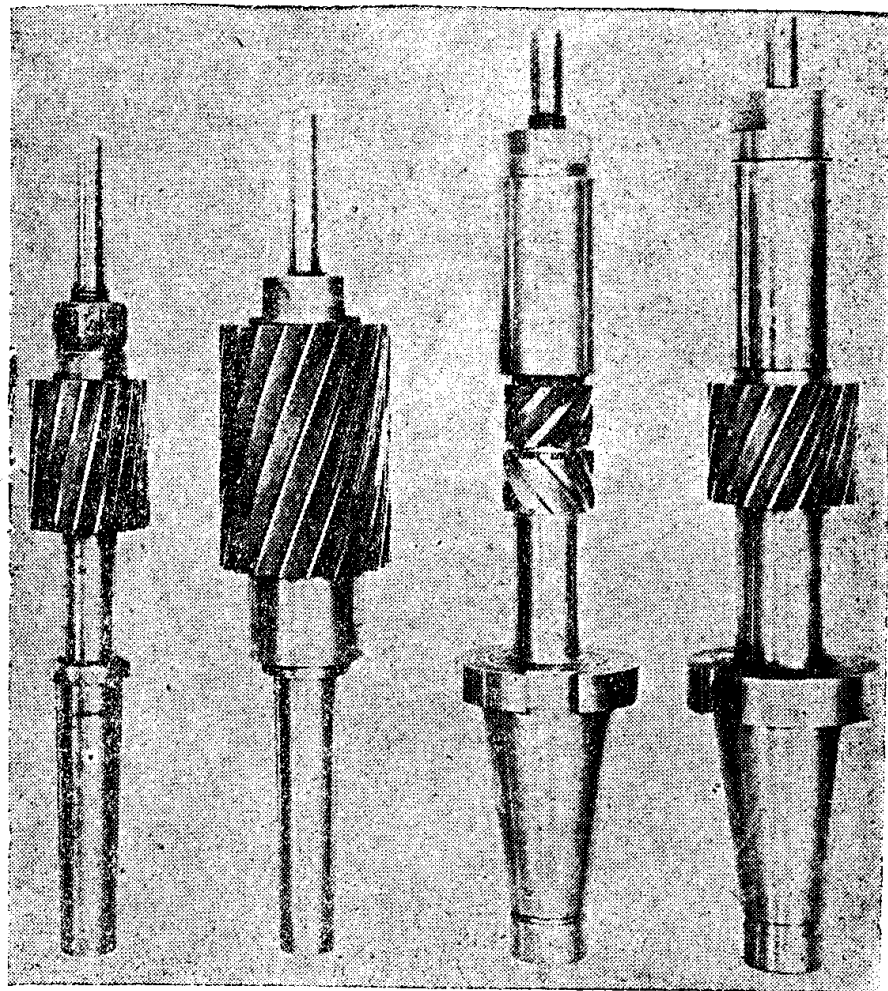


Рис. 13.

в следующих крайних пределах: глубина фрезерования от 0,5 мм до 9,6 мм; подача на 1 зуб от 0,018 мм до 1,05 мм.

$$\frac{A_z}{t \cdot b \cdot S_z} = \frac{1000 \cdot 4500 N_e}{t \cdot b \cdot S_z \cdot Z \cdot n} = \frac{1000 \cdot 4500 \cdot N_e}{t \cdot b \cdot S}$$

$$\frac{1000 \cdot 4500 \cdot N_e}{t \cdot b \cdot S} = \frac{2^{k+1}}{K+2} \cdot \lambda \cdot n^{-k} \cdot S^k \cdot Z^{-k} \cdot t^{\frac{k}{2}} D^{\frac{k}{2}}$$

$$\frac{1000 \cdot 60 \cdot 75 N_e}{t \cdot b \cdot S} = \frac{2^{k+1}}{K+2} \lambda \left(S_z \cdot \sqrt{\frac{t}{D}} \right)^K \dots \dots \dots 8$$

В правой части уравнения 8 мы получили то же самое, что и в правой части уравнения 4. В левой части уравнения 8 мы имеем в числителе мощность N_e путем умножения на 1000.60.75 преобразованную в работу в килограммо-миллиметрах в минуту, а в знаменателе объем стружки, снимаемой в минуту. Т. е. левая часть уравнения 8 представляет собой удельную работу A_w и мы получаем уравнение 7.

$$A_w = C \cdot S_m^K \dots \dots \dots 7$$

Это уравнение нам говорит:

Если уравнение 1 правильно нами выведено и выражает действительную связь между затрачиваемой мощностью и факторами резанья, то в этом случае удельный расход работы при обработке данного материала зависит лишь от срединной толщины стружки. Срединная толщина стружки является результатом величин S , n , Z , S_z , t , D и с какими бы мы ни работали подачами, числами зубцов, числами оборотов, глубинами фрезерования, диаметрами фрез, если мы в комбинации этих различных величин в различных случаях работы будем иметь одну и ту же срединную толщину стружки, удельный расход работы должен быть один и тот же. Это будет служить доказательством правильности уравнения 1.

К такому же выводу в приложении к прямозубой фрезе, только с некоторыми допущениями и графическим методом, пришли Цинке, Гермар и Эренрейхе¹⁰⁾. Мы видим, что здесь никаких допущений нет, и зависимость 7 строго математически вытекает из зависимости 1 и 3.

Если зависимость 7 выразить графически в логарифмических координатах S_m (абсцисса) и A_w (ордината), то получим прямую с углом наклона α к оси абсцисс, при чем $\operatorname{tg} \alpha = K$; эта прямая при $S_m = 1$ мм даст значение $A_w = C$ и отсюда, зная K , нетрудно определить величину λ .

$$\lambda = \frac{K+2}{2^{k+1}} \cdot C.$$

Итак, если результаты ряда опытов (на данном обрабатываемом материале с данным профилем зуба) с различными подачами, глубинами фрезерования, ширинами фрезерования, диаметрами фрез, числами зубцов, подъемами спиралей выразить через удельную работу A_w и построить по данным опытов график $A_w = f(S_m)$, то на этом графике точки всех опытов должны уложиться на одну прямую. Это будет служить с одной стороны доказательством правильности уравнения 1, с другой стороны даст возможность определить из большого числа опытов значения K и λ . Этот метод обработки результатов опыта был нами принят.

Фрезерование чугуна

Прежде всего был исследован вопрос влияния угла подъема спирали зуба β на расход работы при резаньи чугуна $H = 140$. Для этого на маят-

одним зубом, т. е. отнесем работу к единице объема стружки. При этом получим

$$\frac{A_z}{t \cdot b \cdot S_z} = \frac{2^{k+1}}{K+2} \lambda \cdot S_z^k \cdot \frac{t^k}{D^{\frac{k}{2}}},$$

или

$$\frac{A_z}{t \cdot b \cdot S_z} = \frac{2^{k+1}}{K+2} \cdot \lambda \cdot \left[S_z \cdot \sqrt{\frac{t}{D}}^k \right] \dots \dots \dots 4$$

Но

$$\sqrt{\frac{t}{D}} = \sin \frac{\varphi}{2},$$

где: φ — угол контакта, на котором производится снятие стружки зубом фрезы (см. рис. 14).

А отсюда

$$S_z \cdot \sqrt{\frac{t}{D}} = S_z \cdot \sin \frac{\varphi}{2} = S_m \dots \dots 5$$

S_m — это толщина стружки на середине угла контакта, или иначе говоря, „срединная толщина стружки“. Что S_m действительно толщина стружки на середине угла φ , нетрудно убедиться, сравнив ур-ние 5 с уравнением для толщины стружки при любом текущем угле ψ 24)

$$S_e = S_z \cdot \sin \psi$$

В данном случае $\psi = \frac{\varphi}{2}$ и $S_e = S_m$

Подставляя уравнение 5 в 4, получим

$$\frac{A_z}{t \cdot b \cdot S_z} = \frac{2^{k+1}}{K+2} \lambda \cdot S_m^k \dots \dots \dots 6$$

Работу A_z , отнесенную к объему стружки $t \cdot b \cdot S_z$, назовем удельной работой и обозначим через A_w . Величины $\frac{2^{k+1}}{K+2} \lambda$ зависят лишь от обрабатываемого материала и профиля фрезы и могут быть обозначены постоянной C . Тогда имеем:

$$A_w = C \cdot S_m^k \dots \dots \dots 7$$

Уравнение 7 можно получить и из уравнения затраты мощности 1.

$$N_e = \frac{A_z \cdot Z \cdot n}{1000 \cdot 4500}.$$

$$A_z = \frac{1000 \cdot 4500}{Z \cdot n} \cdot N_e$$

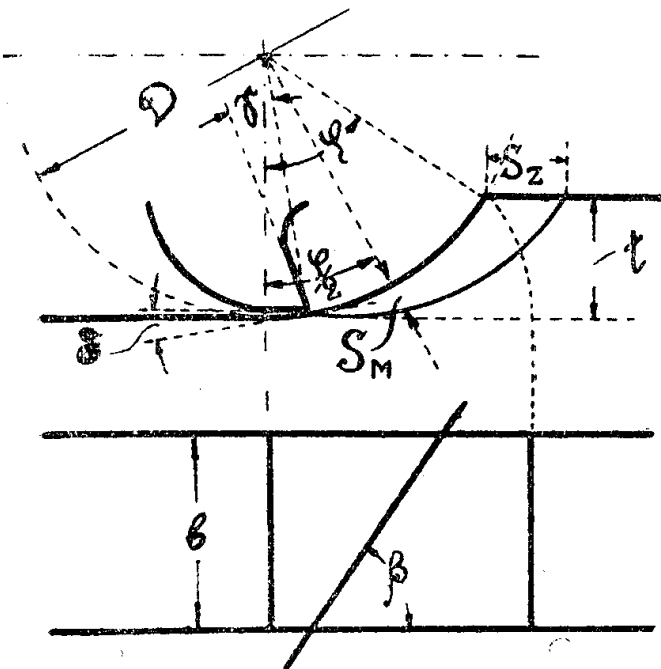


Рис. 14.

Указанные опыты с различным углом подъема спирали были проведены с острой режущей кромкой. После каждой серии опытов повторялись условия первого опыта серии, чтобы путем сравнения результатов определить, не произошло ли затупление. К острым фрезам относятся ниже расположенные прямые на рис. 15 и 16.

На этих же рисунках нанесены под обозначением „притупленный зуб“ более высоко расположенные прямые, о которых будем говорить дальше.

Каждая точка является результатом не менее 3—5 опытов. По рис. 15 и 16 для острого зуба можно сделать заключение, что угол подъема спирали β совершенно не влияет на расход работы. Не представляется возможным указать, чтобы какая-нибудь из фрез давала везде выше или везде ниже расположенные точки, чем другие фрезы. Некоторые, правда очень незначительное разбрасывание точек может быть объяснено неравномерной твердостью чугуна.

Для наглядности приводим протокол опытов с двумя крайними значениями угла $\beta = 90^\circ$ и 45° (табл. 5).

Таблица № 5

Чугун $H = 130—150$; $b = 25$ мм; $t = 2,6$ мм
 $D = 61$ мм; $\gamma = 0^\circ$

S_z мм	A_z при $\beta = 90^\circ$ кг мм	A_z при $\beta = 45^\circ$ кг мм	П р и м е ч а н и е
0,1	1250	1180	Каждое значение является средним на 3—5 опытов.
0,2	2590	2430	
0,3	3310	3310	
0,4	4030	4120	
0,5	4560	4900	
0,6	5360	5450	
0,8	6480	6420	
0,1	1240	1250	
			Контрольные.

После опытов с острыми фрезами, эти однозубые фрезы были одеты на оправку фрезерного станка и пущены в работу до того момента, пока все они не получили одинакового затупления, характеризуемого повышением расхода работы на срез одной стружки при $b = 25$ мм, $S_z = 0,3$ мм, $t = 4,5$ мм на 35% в сравнении с острыми фрезами. Это затупление еще не является предельным и нами было выбрано лишь для того, чтобы проверить, не будет ли притупленный зуб давать иной закономерности, чем острый. По верхним прямым рис. 15 и 16 мы видим, что для притупленного зуба угол подъема спирали β не оказывает никакого влияния на расход работы. Эти же притупленные в одинаковой степени фрезы были в дальнейшем применены и при опытах по стали.

Параллельно с этими опытами были проведены опыты на фрезерном станке с чугунами $H = 100—105$, $H = 140$ и $H = 170$. Результаты опытов представлены на рис. 17, 18, 19. Здесь опять даны результаты работы с острой и с притупленной фрезой. Притупленная фреза была далека от разрушения режущих кромок и давала вполне нормальную обрабатываемую поверхность. Для создания притупления фреза работала в течение 30 мин. со скоростью $v = 24$ м/мин., с подачей $S = 100$ мм/мин., с глубиной $t = 2$ мм по рельсовой стали. Степень затупления однозубых фрез была взята значительно выше, чем нормальной многозубой.

Из рис. 17, 18, 19 можно сделать заключение, что опыты, проведенные с различными D , S , t , Z , b , β , укладываются точно на одну прямую, что

никовом динамометре производились опыты с фрезами $D=61$ мм с не-поднутренным зубом, имеющим углы подъема спирали $\beta=90^\circ$ (прямо зубая фреза); $\beta=75^\circ$; $\beta=65^\circ$ и $\beta=45^\circ$. Опыты проводились с шириной фрезерования $b=25$ мм, глубиной фрезерования $t=7$ мм и $t=2,5$ мм. Подача на один зуб менялась от $S_z=0,05$ мм до $S_z=0,8$ мм. Результаты

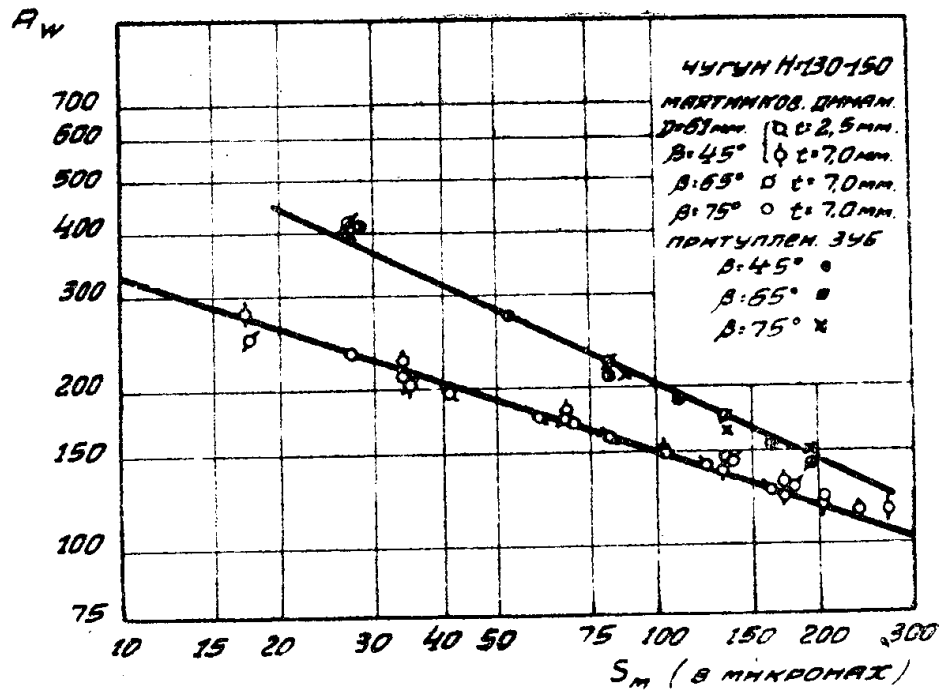


Рис. 15.

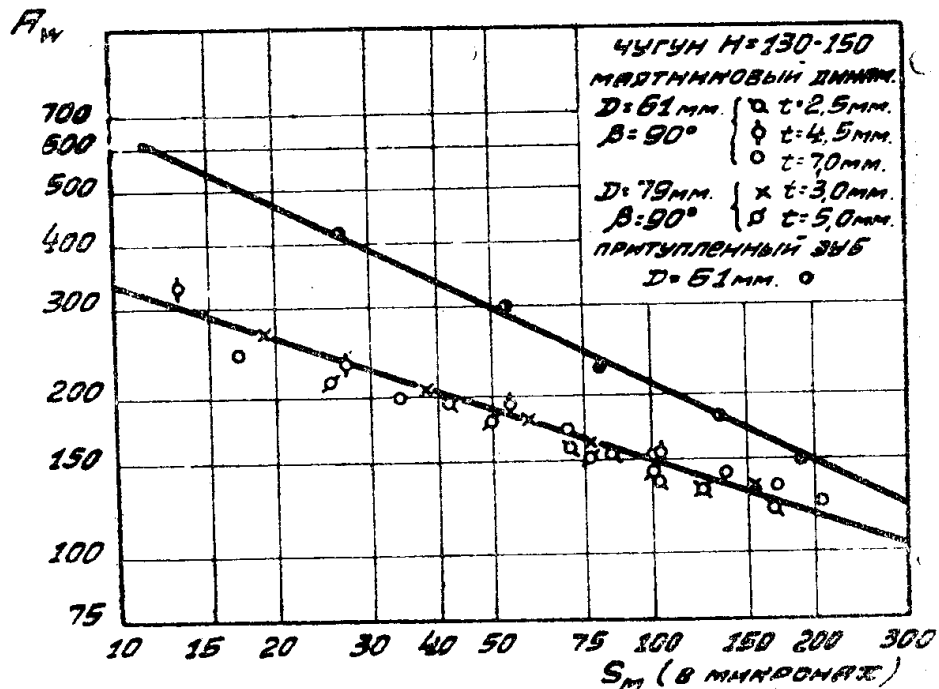


Рис. 16.

опытов для $\beta=45^\circ$, 65° , 75° представлены на рис. 15; для $\beta=90^\circ$ — на рис. 16. На рис. 16 нанесены также точки, относящиеся к фрезе $D=79$ мм, при $t=3,0$ мм и $t=5$ мм.

рое незначительное расхождение, что может быть объяснено неравномерностью материала, различной степенью остроты зубьев фрезы, неизбежным

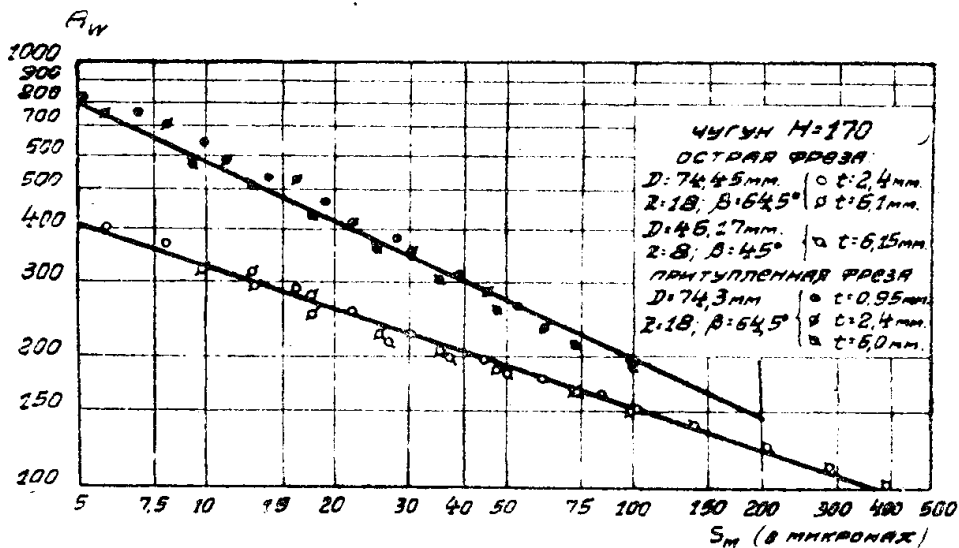


Рис. 19.

биением фрезы и т. д. Что эти расхождения незначительны, можно судить из сравнения этих рисунков с рис. 20, на котором представлены обработанные нами для сравнения результаты опытов Bahlecke⁸⁾ по чугуну $H=190$. Здесь мы видим несравненно более значительные расхождения даже в пределах производства опытов одним методом.

Из приведенных графиков нетрудно получить значения K и λ для уравнения 1. Но прежде укажем, что по этим же графикам видно, что значение K , как тангенс угла наклона прямой к оси абсцисс, для притупленного зуба будет выше, нежели для острого. Мы исследовали характер

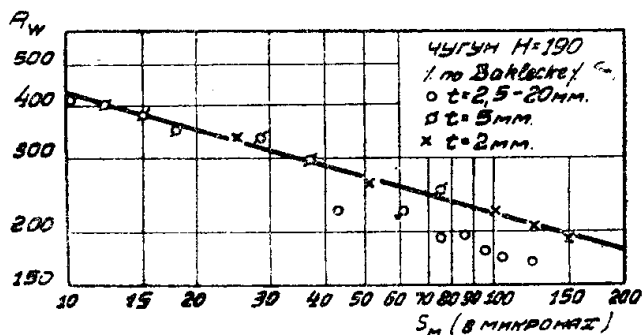


Рис. 20.

изменения величины K с возрастанием затупления зуба. Фреза углеродистой стали с одним зубом была пущена в работу по чугуну при $t=3 \text{ мм}$, $S_z=0,025 \text{ мм}$ и $v=55 \text{ м/мин}$. Через известные промежутки времени фреза снималась со станка, ставилась на маятниковый динамометр, где проводились необходимые опыты. Результаты представлены на рис. 21, где нанесены три кривые, дающие изменение расхода работы при трех различных подачах, в зависимости от времени работы фрезы на станке и кривая $K=f(T)$, дающая характер изменения величины K от времени работы фрезы, т. е. от степени затупления зуба.

По рис. 21 можно видеть, что одно и то же затупление характеризуется при тонких стружках более значительным приростом расхода работы, чем при толстых. По рис. 21 при $T=28$ минут, мы имеем для $S_z=0,5 \text{ мм}$ прирост расхода работы лишь 10%, при $S_z=0,1 \text{ мм}$ прирост достигает 60%. Это вполне понятно, т. к. тонкая стружка опирается на самое лезвие фрезы, состояние которого является основным фактором, определяющим расход работы. Толстая же стружка, минуя лезвие, опирается на переднюю грань зуба. При $T=43$ мин. было замечено разрушение зуба, выявляющееся выщербливанием режущей кромки с затылочной

категорически подтверждает точность выведенного нами уравнения 1 для затраты мощности при фрезеровании, а также и точность уравнения 2 для удельного давления резания, принятого нами за исходное.

Угол подъема спирали β не оказывает никакого влияния на расход работы, а значит и на среднюю мощность при фрезеровании чугуна, как при остром, так и при притупленном зубе фрезы.

Наши опыты по чугуну были проведены с широкими пределами подач и глубин. Максимальная подача на 1 зуб для фрезы с $D=46$ мм и $Z=8$

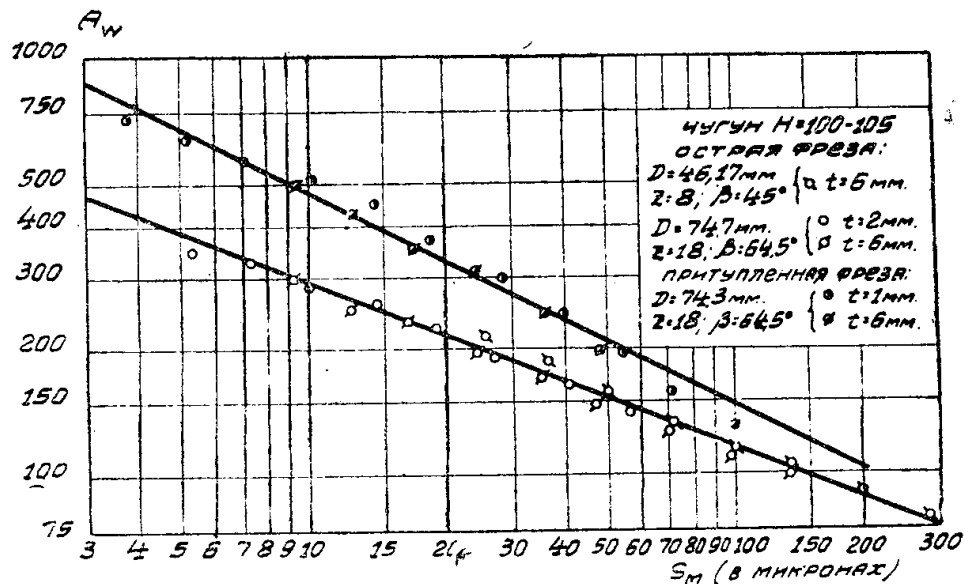


Рис. 17.

доходила до значения $S_z=1,05$ мм, что при нормальной величине скорости резания для быстрорежущей фрезы по чугуну средней твердости $v=20$ м/мин. ²⁹⁾ дает подачу в миллиметрах в минуту $S=1100$ мм/мин. Таким образом мы полностью захватили и считаем, что даже превысили

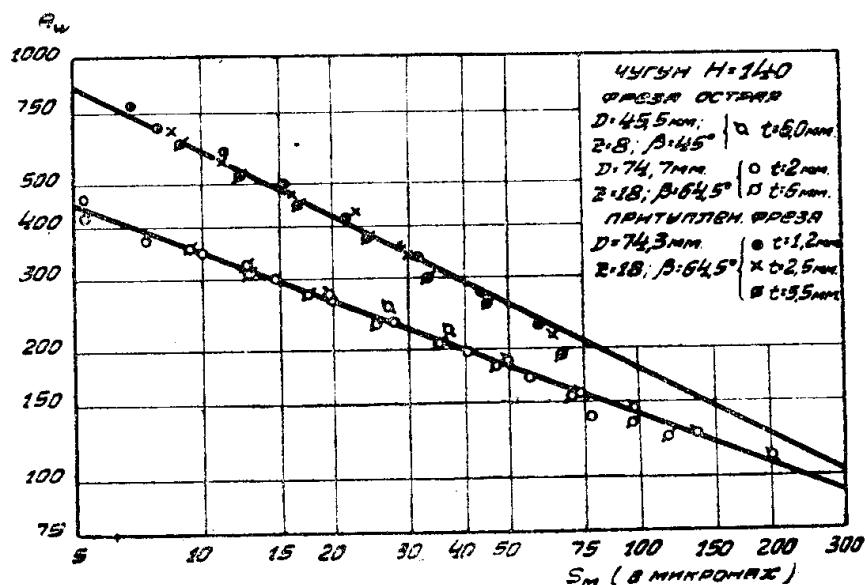


Рис. 18.

пределы подач, применяемые при обдирочной работе. Это служит достаточно хорошим указанием на применимость наших выводов для практики.

Сравнивая рис. 15 (результаты опытов с маятниковым динамометром) с рис. 18 (опыты по тому же чугуну на станке), можно заметить некото-

ления в работе Иванова ³²⁾ вряд ли может быть рекомендовано для столь дорогого инструмента, как фреза. По рис. 21 видно, что с самого начального момента работы величина K (величина, входящая в показатели степени переменных уравнения 1) быстро начинает возрастать и изменяется в широких пределах от $K = -0,31$ для только что заточенной фрезы до $K = -0,62$ для затупленной. Это необходимо принять во внимание при установлении коэффициентов и показателей степеней в уравнении 1, т. к. если мы дадим их для только что заточенной фрезы, то через краткий промежуток времени работы фрезы это уравнение будет давать расход энергии ниже действительного.

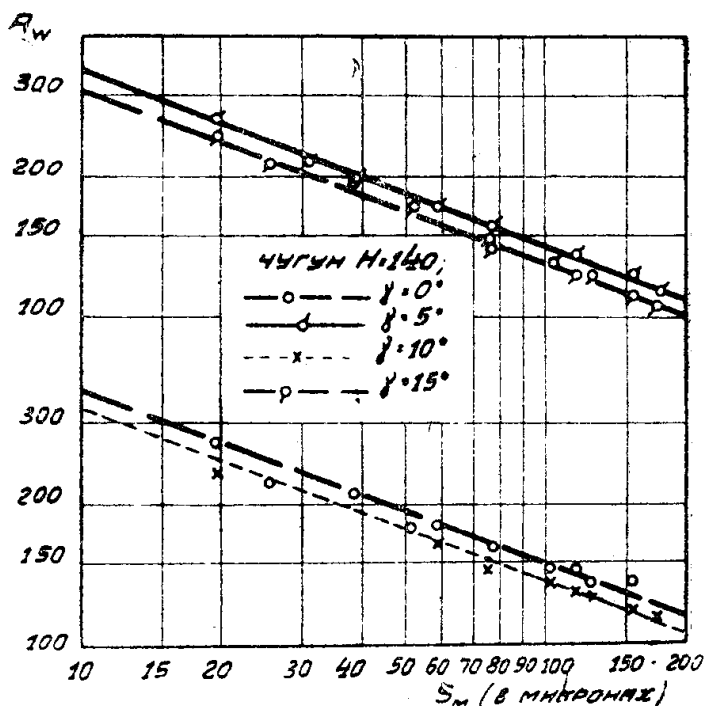


Рис. 22.

На рис. 22 представлена зависимость расхода работы при различных углах поднутрения от $\gamma = 0^\circ$ до $\gamma = 15^\circ$. Опыты были произведены на маятниковом динамометре одним и тем же зубом, переставленным в различные прорезы оправки (см. рис. 6).

Влияние угла поднутрения на расход работы при обработке чугуна можно выразить коэффициентами (таб. 6).

Таблица № 6

Угол поднутрения γ	Коэффициент расхода работы	Примечание
0°	1	Предположительно.
5°	0,96	
10°	0,92	
15°	0,87	
20°	0,82	

На основе опытов, проведенных с чугуном, имеем следующие значения постоянных в уравнении мощности и удельного давления (табл. 7).

Таблица № 7

№	Обрабатываемый материал	λ	K^*		Примечание
			Острая фреза	Притупл. фреза	
1	Чугун $H = 100$	50	-0,4	-0,51	Рис. 17
2	Чугун $H = 140$	60	-0,39	-0,52	Рис. 18
3	Чугун $H = 170$	75	-0,34	-0,46	Рис. 19
4	Чугун $H = 190$	95—115	-0,29	—	Рис. 20 (по Bahlecke)

границы зуба. Между $T=30$ минут и $T=40$ минут мы видим на рис. 21 более быстрое возрастание расхода работы, нежели до этого промежутка времени. При $T=43$ минуты, когда зуб можно считать достаточно затупленным и требующим переточки, прирост расхода работы при $S_z=0,1$ мм составлял 112%, при $S_z=0,5$ мм лишь 29%. Цифры процентного повышения расхода работы проставлены на кривых рис. 21. Проведенные таким же образом опыты по постепенному затуплению нормальной (многозубой) быстрорежущей фрезы при работе по стали, показали точно такое же явление. С момента пуска фрезы в работу сразу же начинается повышение расхода работы. Чем толще стружка (больше подача S_z или глубина t), тем меньшим приростом расхода работы в процентах характеризуется одно и то же затупление фрезы.

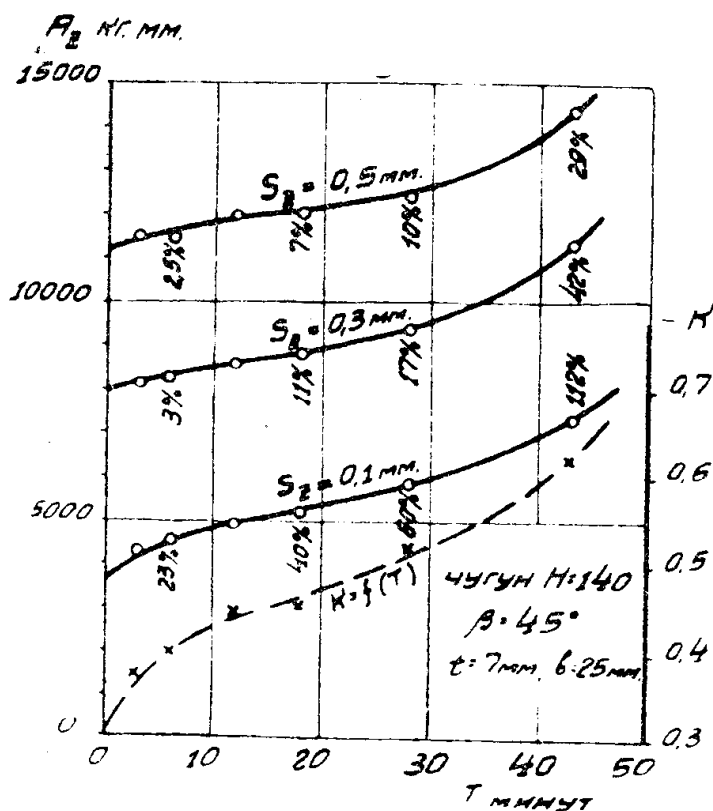


Рис. 21.

Таким образом, при работе фрезы затупление режущей кромки выглядит и выявляется расходом работы иначе, нежели при работе токарного резца, для которого давление резанья возрастает значительно лишь перед самым моментом затупления резца, оставаясь на протяжении всего опыта примерно постоянным, что особенно относится к быстрорежущим резцам. Кроме того при малых стружках углеродистый резец дает более высокое давление резанья, чем быстрорежущий ³⁰⁾, в нашем же исследовании мы не получали никакой разницы при работе углеродистых и быстрорежущих фрез, что можно видеть из приведенных графиков.

На основе всего сказанного относительно затупления фрезы, можно сделать заключение, что за критерий затупления фрезы не может быть принято повышение расхода энергии при резаньи на определенное количество процентов, т. к. этот объективный показатель не будет при различных режимах характеризовать одно и то же состояние лезвия. С этой точки зрения вызывают серьезные сомнения опыты Сафонова ³¹⁾, в которых по его заявлению, при тонких стружках ему не удалось получить значительного прироста давления подачи даже для очень тупой фрезы, в то время как при толстых стружках было налицо значительное повышение. Видимо, аппаратура, применяемая им при опытах, была недостаточно надежна, т. к. из рис. 21, как и из всех ранее нами приведенных для чугуна и далее приводимых для различных сталей, из сравнения кривых для острой фрезы и притупленной, на основе сотен опытов можно сделать совершенно обратное заключение. Видимо за критерий затупления должны быть приняты либо чистота обрабатываемой поверхности, объективно измеряемая, либо различное при различных режимах повышение расхода энергии, определенное предварительными опытами и характеризующее одно и то же затупление лезвия. Сгорание режущей кромки, принятое за критерий затуп-

ления в работе Иванова ³²⁾ вряд ли может быть рекомендовано для столь дорогого инструмента, как фреза. По рис. 21 видно, что с самого начального момента работы величина K (величина, входящая в показатели степени переменных уравнения 1) быстро начинает возрастать и изменяется в широких пределах от $K = -0,31$ для только что заточенной фрезы до $K = -0,62$ для затупленной. Это необходимо принять во внимание при установлении коэффициентов и показателей степеней в уравнении 1, т. к. если мы дадим их для только что заточенной фрезы, то через краткий промежуток времени работы фрезы это уравнение будет давать расход энергии ниже действительного.

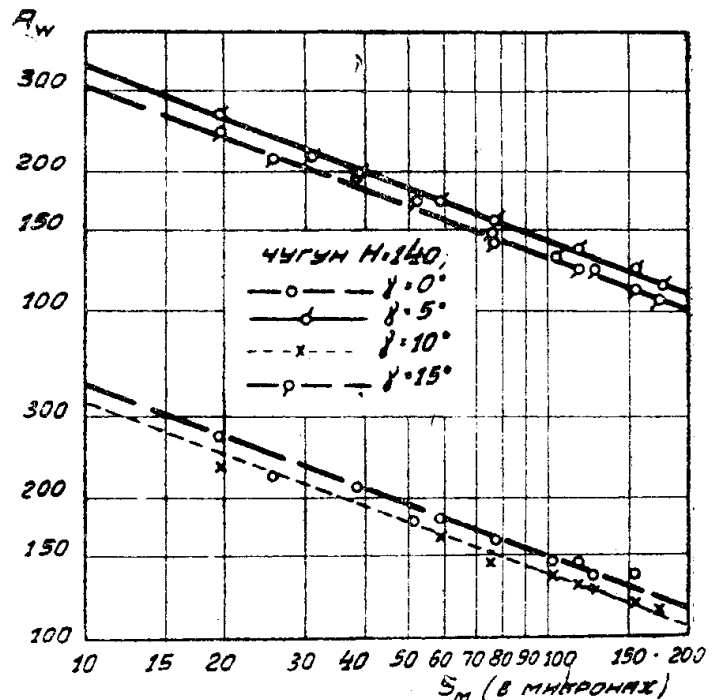


Рис. 22.

На рис. 22 представлена зависимость расхода работы при различных углах поднутрения от $\gamma = 0^\circ$ до $\gamma = 15^\circ$. Опыты были произведены на маятниковом динамометре одним и тем же зубом, переставленным в различные прорезы оправки (см. рис. 6).

Влияние угла поднутрения на расход работы при обработке чугуна можно выразить коэффициентами (таб. 6).

Таблица № 6

Угол поднутрения γ	Коэффициент расхода работы	Примечание
0°	1	Предположительно.
5°	0,96	
10°	0,92	
15°	0,87	
20°	0,82	

На основе опытов, проведенных с чугуном, имеем следующие значения постоянных в уравнении мощности и удельного давления (табл. 7).

Таблица № 7

№	Обрабатываемый материал	λ	K^*		Примечание
			Острая фреза	Притупл. фреза	
1	Чугун $H = 100$	50	-0,4	-0,51	Рис. 17
2	Чугун $H = 140$	60	-0,39	-0,52	Рис. 18
3	Чугун $H = 170$	75	-0,34	-0,46	Рис. 19
4	Чугун $H = 190$	95—115	-0,29	—	Рис. 20 (по Bahlecke)

Из графиков рис. 15, 16, 17, 18, 19, можно видеть, что λ для притупленного зуба имеет то же значение, что и для острого зуба и повышение расхода энергии получается за счет изменения величины K .

Фрезерование стали.

На рис. 23 представлены результаты опытов по стали средней твердости 1, $K_z = 54$ кг/мм на маятниковом динамометре с различными углами

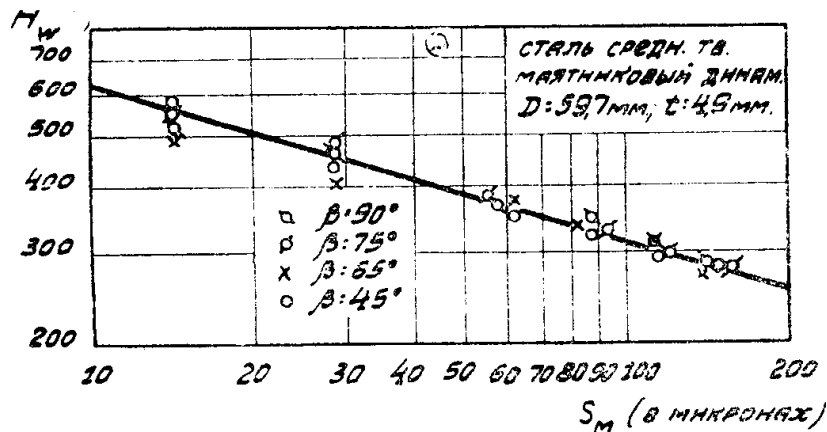


Рис. 23.

подъема спирали β от 90° до 45° при $t = 5$ мм. И здесь также мы видим отсутствие влияния угла подъема спирали зуба на расход работы, а значит и на среднюю мощность. Рис. 23 дает работу острых фрез.

На рис. 24 и 25 представлены опыты по стали средней твердости на фрезерном станке с различными Z , D , S , S_z , t , b , β и дают те же закономерности, о которых мы говорили в приложении к чугуну. На этих двух

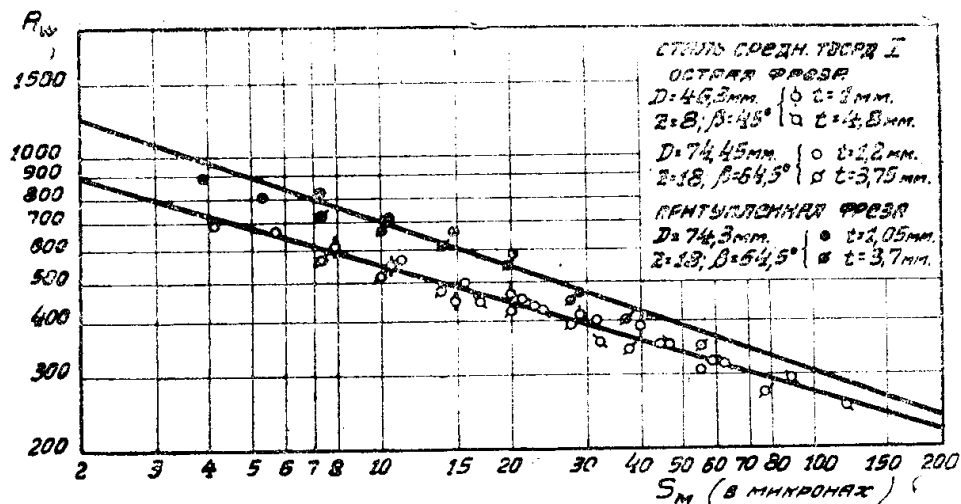


Рис. 24.

рисунках мы имеем углы подъема спирали фрез $\beta = 45^\circ$, $\beta = 64,5^\circ$ и $\beta = 80^\circ$ и видим, что и при опытах на станке все эти фрезы с столь значительной разницей в подъеме спирали дают один и тот же расход работы. Для всех этих фрез была также подобрана ширина фрезерования, обеспечивающая постоянство крутящего момента на фрезе.

На рис. 24 кроме того даны результаты работы с притупленной фрезой, которая до опытов работала 30 мин. при $v = 24$ м/мин., $t = 2$ мм, $S = 100$ мм/мин. по рельсовой стали (см. выше).

Мы видим то же явление влияния затупления на расход работы при фрезеровании стали, что и при фрезеровании чугуна.

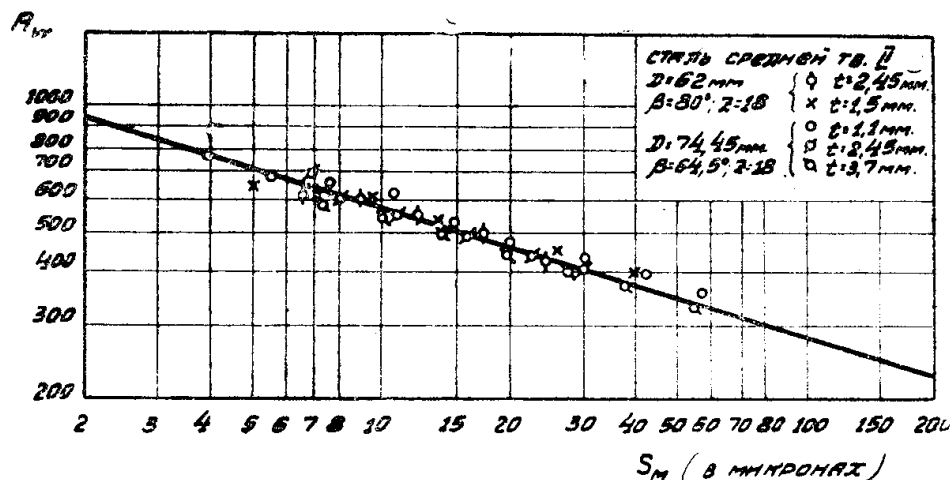


Рис. 25.

На рис. 26 дано сравнение различного затупления фрез. Острая, только что заточенная, фреза дает $K = -0,25$.

Фреза после 1500 оборотов при скорости резанья $v = 6$ м/мин., что для быстрорежущей фрезы по стали $K_z = 54$ много ниже нормальной, дает $K = -0,28$.

Самая верхняя прямая на рис. 26 дает расход работы фрез с различными углами подъема спирали β . Здесь еще более значительное затупление (но одинаковое для всех фрез с различными β) (о чем говорилось выше) и величина $K = -0,49$. Мы видим насколько значительно изменяется величина K с изменением состояния режущей кромки зуба, при чем надо отметить, что мы не доводили кромку до разрушения. При этом видимо значение K еще более бы возросло.

По этому же рис. 26 видно, что притупленные фрезы не дают разницы в расходе работы при фрезеровании с различными углами подъема спи-

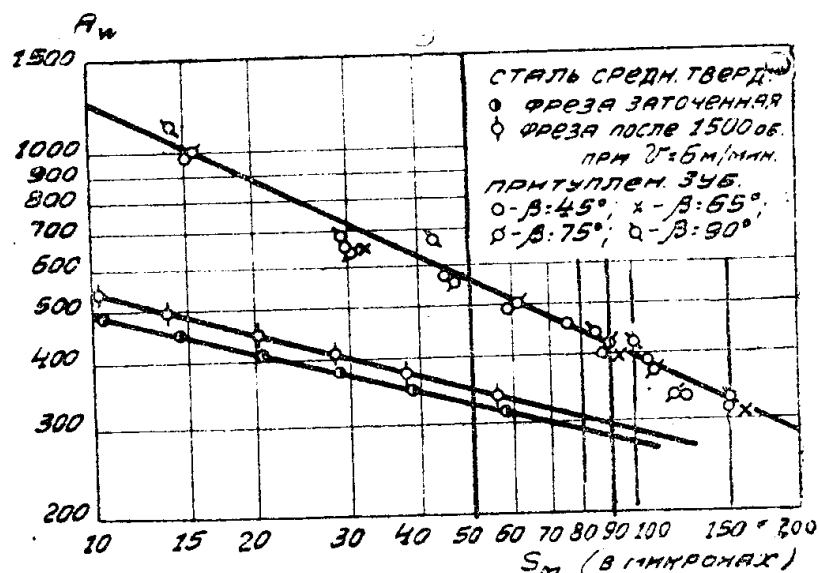


Рис. 26.

рали β , т. е. в приложении к стали мы имеем то же самое, что и при обработке чугуна.

На рис. 27 даны результаты фрезерования мягкой стали с $K_z = 34 \text{ кг/мм}^2$. Интересно отметить, что при фрезеровании мягкой стали мы имели точно тот же расход работы, что и при фрезеровании стали средней твердости,

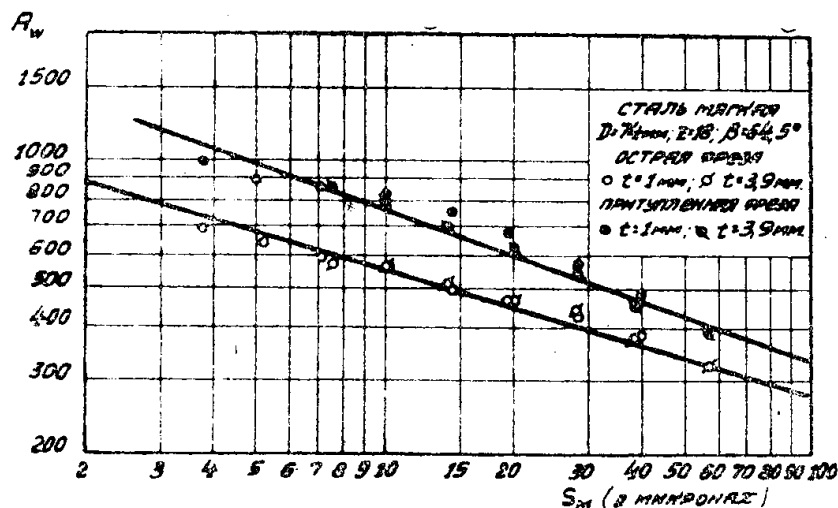


Рис. 27.

что видно из сравнения рис. 27 и 24, хотя прочность на разрыв этих двух сталей имеет значительную разницу. Это видимо объясняется высокой вязкостью мягкой стали, которая имела относительное удлинение на разрыв 39%, против 24% стали средней твердости (см. таб. 4).

На рис. 28 приведены результаты обработки твердой стали $K_z = 76 \text{ кг/мм}^2$, также подтверждающие все сказанное выше. Хромистая сталь (см. табл. 4)

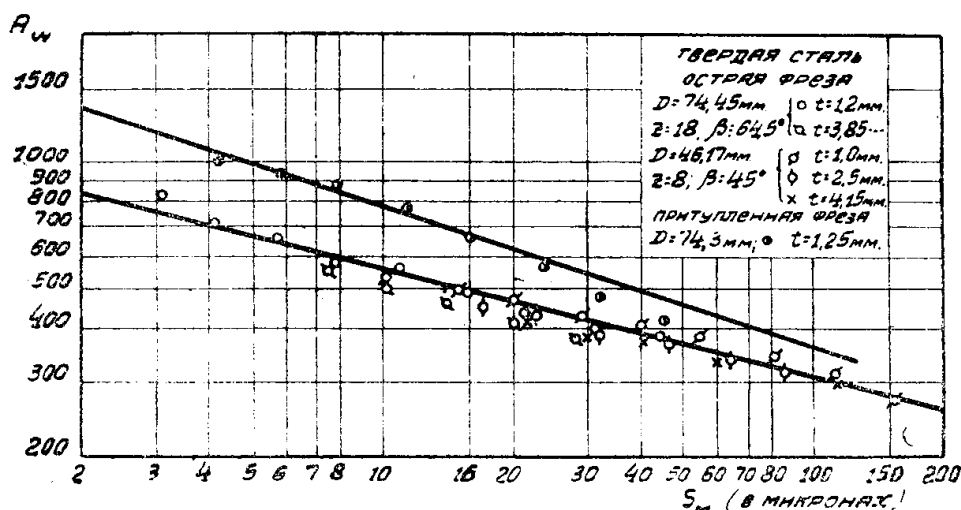


Рис. 28.

была испытана как на станке, так и на маятниковом динамометре. Рис. 29, 30, 31, 32 дают возможность судить о влиянии угла подъема спирали на расход работы. Здесь мы видим некоторое влияние угла β . При $\beta=45^\circ$ затрата работы на 6% ниже, чем при $\beta=90^\circ$. Столь незначительная разница не может служить основой для введения влияния угла подъема спирали в уравнение мощности.

Рис. 33 и 34 дают результаты опытов по той же хромистой стали на на фрезерном станке. Здесь же нанесены и точки опытов на маятниковом динамометре, при чем они дают очень хорошее соответствие с результатами опытов на станке.

При обработке стали на станке с $K_2 = 54 \text{ кг/мм}^2$ и хромистой стали определялось также влияние угла поднутрения на расход работы. Эти ре-

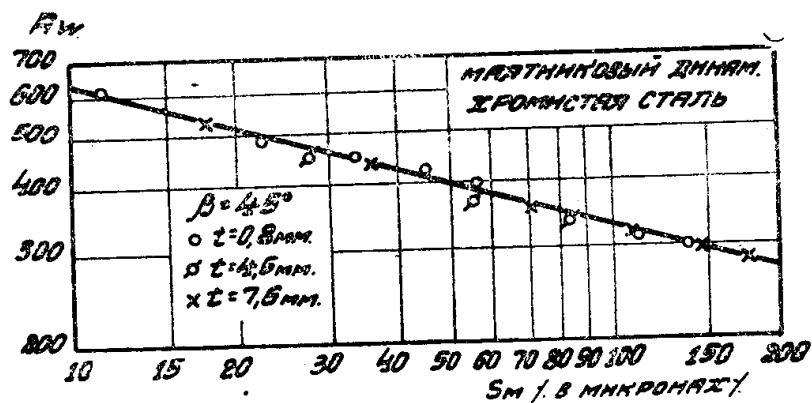


Рис. 29.

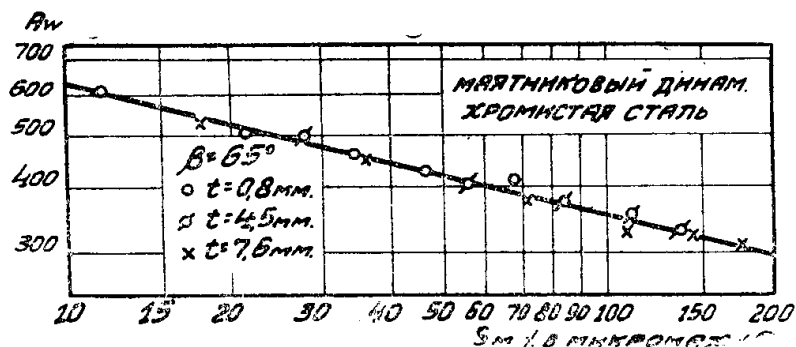


Рис. 30.

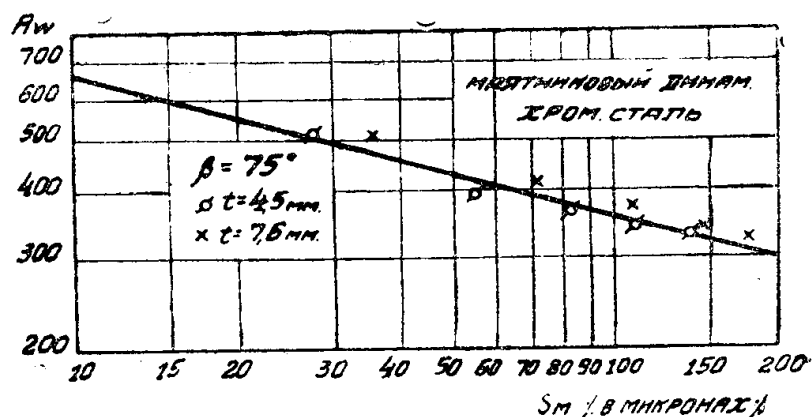


Рис. 31.

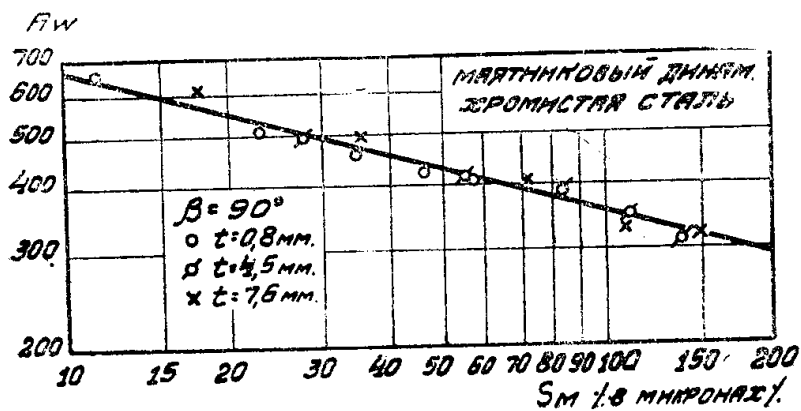


Рис. 32.

зультаты выражены коэффициентами в табл. 8, куда внесены и коэффициенты для чугуна из табл. 6.

Таблица 8

Угол поднутрения γ	Коэффициент расхода работы	
	Сталь	Чугун
0°	1	1
5°	0,94	0,96
10°	0,87	0,92
15°	0,80	0,87

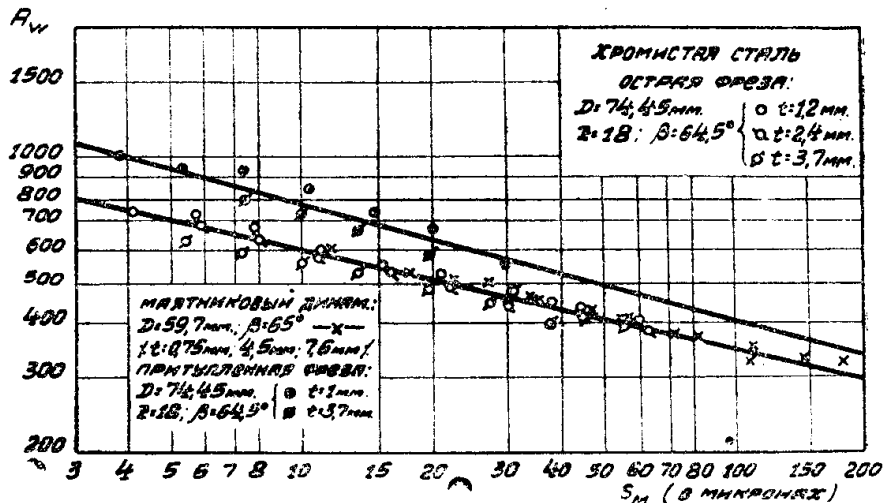


Рис. 33.

Изменение расхода работы с изменением угла поднутрения по нашим опытам близко подходит к данным Beckh ⁵⁾, Oxford ⁴⁾ и к данным Гле-

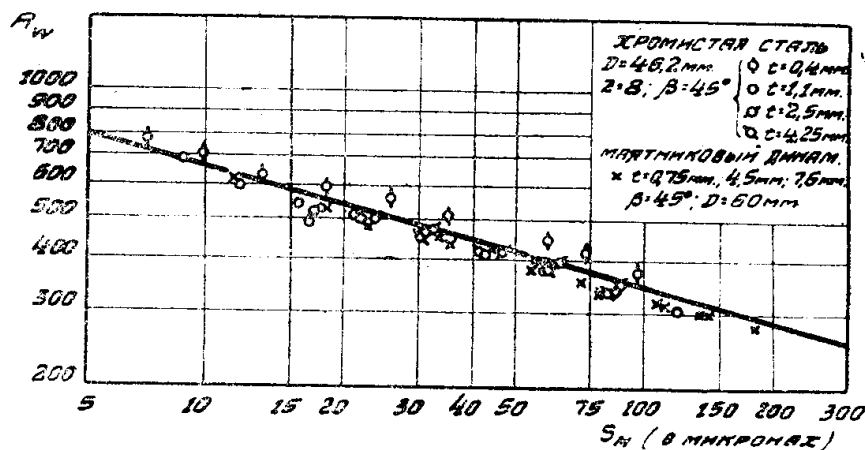


Рис. 34.

бова, разработанным на основе опытов Никольсона, Стентона и Гейда, Манчестерского Комитета и Бостона. Совершенно невероятны данные Соколова ³³⁾, говорящие об уменьшении расхода работы на 5% на каждый 1° угла поднутрения зуба.

Предельная максимальная подача на 1 зуб, до которой мы доходили при опытах по стали, равнялась $S_z = 1,05$ мм; таким образом, мы и здесь полностью захватили пределы обдирочной работы. Максимальная глубина резанья $t = 7,6$ мм представляется нам точно также вполне достаточной.

Из всех приведенных графиков для стали можно сделать заключение, что опытные точки несколько более разбрасываются, нежели при опытах по чугуну, но проведенные средние прямые достаточно хорошо удовлетворяют всем опытам, проведенным в широких пределах изменения переменных, и должны быть признаны надежно выражающими зависимость работы от факторов резанья.

На рис. 35 приведены результаты опытов по алюминию, которые, будучи проведены в еще более широких пределах глубин резанья, подтверждают все указанное выше.

Таким образом все большее количество опытов, проведенных нами двумя совершенно различными методами, с различной аппаратурой, ука-

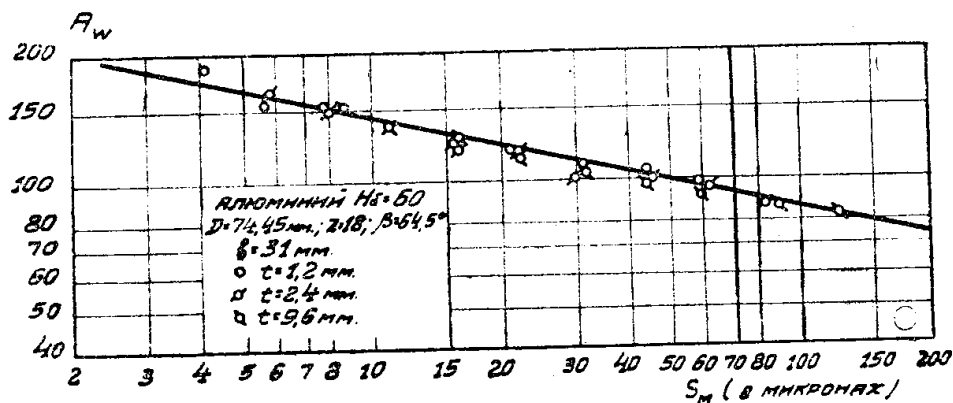


Рис. 35.

зывают на правильность выведенного нами теоретически уравнения затраты мощности при работы цилиндрической фрезы с прямым и спиральным зубом ²⁴⁾. Угол подъема спирали не оказывает влияние на расход работы и на среднюю мощность при фрезеровании. Мы думаем, что приведенные результаты эксперимента являются наилучшим доказательством того положения, которое в разрез с общим мнением было выдвинуто нами в прошлой нашей работе, что толщина стружки на спиральном зубе фрезы, также как и на прямом, зависит лишь от подачи на 1 зуб и от мгновенного положения данной точки зуба и совершенно не зависит от угла подъема спирали зуба β , так как только при этом может отсутствовать влияние угла β на расход работы. Положение по существу простое и достаточно ясно нами, аналитически, а затем и инж. Ереминым ³⁴⁾ графически доказанное, которое, однако, несмотря на свою простоту, вызывает сомнения у многих, о чем мы судим по технической литературе ²¹⁾, ²²⁾, ³⁵⁾, ³⁶⁾, вышедшей и до, и после нашей работы и по целому ряду писем, нами полученных. Совершенно недопустимые установки дает инженер Тишин, основываясь на данных проф. Саввина, в сборнике руководящих данных Гипромаша по режимам фрезерования ³⁷⁾, где он приводит нижеследующую таблицу коэффициентов для перехода от мощности прямозубой к мощности спиральной фрезы.

$90^\circ - \beta$	5°	10°	15°	20°	25°	30°	35°	40°	45°
Коэффициент	0,73	0,57	0,47	0,42	0,39	0,37	0,35	0,34	0,33

Иначе говоря по „руководящим материалам“ при работе фрезы с $\beta = 45^\circ$ затрата мощности составляет 33% от таковой же при прямом зубе с $\beta = 90^\circ$.

Мы думаем, что такая колоссальная разница может быть замечена без всяких приборов и наша аппаратура несомненно должна была ее отметить.

На основе приведенного материала можно дать следующие значения λ и K (табл. 9).

Таблица 9

№	Обрабатываемый материал	λ	K	
			Острая фреза	Притуп. фреза
1	Сталь мягкая $K_z = 34$	142	— 0,3	— 0,36
2	Сталь ср. твер. $K_z = 54$	142	— 0,3	— 0,36
3	Сталь твердая $K_z = 76$	180	— 0,26	— 0,33
4	Сталь хромистая $K_z = 74$	205	— 0,23	— 0,28
5	Алюминий литой $H = 60$	53	— 0,22	—

Приведенные в таблицах 7 и 9 значения K могут применяться в пределах до $S_m \leq 1$ мм, что вполне достаточно для самых тяжелых режимов. Для $S_m > 1$ мм, пользуясь данными в таблицах значения K , мы получили бы при работе с притупленной фрезой меньшую мощность, чем при работе с острой, что конечно является абсурдом. При просмотре приведенных графиков можно видеть, что для притупленной фрезы мы не имеем точно прямой линии, а имеем некоторые кривые, асимптотически приближающиеся к прямым для острой фрезы в области крупных стружек. Таким образом для притупленной фрезы K не является величиной постоянной, а постепенно, по мере увеличения S_m , уменьшается, приближаясь к значению K для острой фрезы, и с какого-то значения S_m величина K для тупой будет равна величине K для острой.

Мы, не желая вводить излишнего усложнения, приняли и для притупленной фрезы $K = \text{const}$, что, в пределах применимых для фрезерования значений $S_m < 1$ мм, достаточно хорошо соответствует расположению опытных точек.

В виду того, что затупление зуба фрезы протекает по иному нежели токарного резца, начинаясь с самого начального момента работы ее, что влечет за собой постепенное изменение величины K , было бы ошибочным рекомендовать для практических расчетов значение K для только что заточенной фрезы. Мы считаем, что здесь нужно ориентироваться на среднепритупленную, находящуюся в рабочем состоянии фрезу и взять для этого значение K среднее между острой и притупленной фрезой. Такие значения пригодные для практических расчетов, даны нами в табл. 10.

Таблица 10

№	Обрабатываемый материал	λ	K	Примечание
1	Чугун $H = 100$	50	— 0,45	По Bahlescke
2	Чугун $H = 140$	60	— 0,45	
3	Чугун $H = 170$	75	— 0,40	
4	Чугун $H = 190$	100	— 0,35	
5	Сталь $K_z = 34$	142	— 0,33	
6	Сталь $K_z = 54$	142	— 0,33	
7	Сталь $K_z = 76$	180	— 0,29	
8	Сталь хромистая $K_z = 74$	205	— 0,26	
9	Алюминий $H = 60$	53	— 0,24	

Мы включили сюда чугун $H = 190$ по опытам Bahlescke, в виду того, что опыты по стали средней твердости, проведенных нами, дали исключительно точное совпадение с таковыми же, проведенными Bahlescke; это дает возможность предполагать, что данные его по чугуну также точны.

Таблица 10 представлена графически на рис. 36 в координатах S_m — A_w . Здесь мы замечаем прежде всего, что чем прочнее материал, тем выше

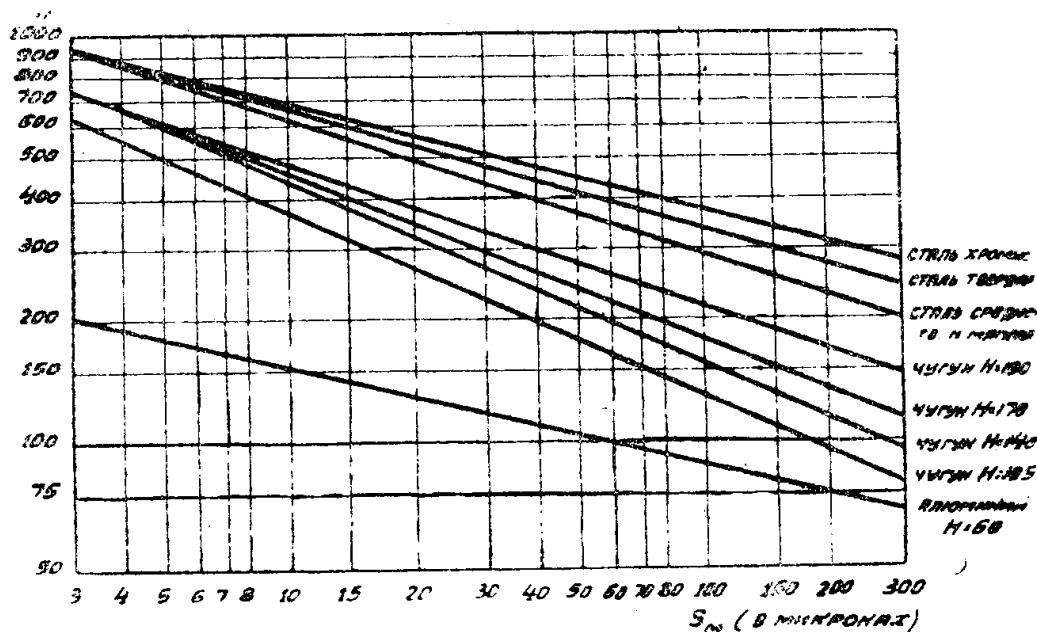


Рис. 36.

расположена прямая, характеризующая расход работы при его фрезеровании. Кроме того, в результате различного наклона прямых (различные значения K), прямые в области малых стружек сходятся, что дает один и тот же расход работы при фрезеровании материала различной прочности. Это явление вполне закономерно, т. к. еще Шлезингер³⁸⁾ заметил, что при шлифовании, когда имеются особенно тонкие стружки, окружная сила при обработке даже столь различных материалов, как чугун и сталь не имеет разницы.

Здесь же нужно отметить, что соотношения коэффициентов λ для сталей различной твердости совершенно не подтверждают указаний проф. Саввина, что этот коэффициент в уравнении для удельного давления резания для стали должен быть равен учетверенному сопротивлению на разрыв. При этом мы должны были бы получить для стали с $K_z = 76$ величину $\lambda = 304$, у нас же получено $\lambda = 180$.

Кроме того нужно указать, что механическое перенесение зависимостей и коэффициентов, найденных для токарной работы, в процесс фрезерования, как это делает проф. Резников, не может дать удовлетворительных результатов, т. к. при этом мы должны были бы получить одно и то же значение K для материалов различной твердости. По таблицам 7, 9 и 10 видно, что с увеличением твердости обрабатываемого материала, значение K уменьшается, что хорошо согласуется с опытами Boston and Kraus¹³⁾.

Мы можем дать следующие уравнения для определения полезной мощности при фрезеровании (в лошадиных силах) (см. табл. 11).

Уравнения довольно сложны и проще пользоваться графическим их решением. Построение номограммы для этого не составляет затруднений. Как пример нами на рис. 37 приводится номограмма для разрешения уравнения мощности при обработке чугуна $H=170$ (по рис. 36). Такие же номограммы нетрудно построить и для других обрабатываемых материалов. В этой номограмме, как и в приведенных уравнениях не принято во внимание влияние угла поднутрения, т. е. они даны для неподнутренного зуба. В случае наличия поднутрения, полученные результаты нужно множить на соответствующие коэффициенты табл. 8. При этом нужно ориен-

Таблица 11

Обрабатываемый материал	Уравнение мощности для острой фрезы	Уравнение мощности для средне-пригупленной фрезы
1. Чугун $H=100-105$	$N_e = \frac{2^{0,6}}{1,6} \cdot \frac{50}{4500 \cdot 1000} n^{0,4} \cdot b \cdot S^{0,6} \cdot f^{0,8} \cdot Z^{0,4} \cdot D^{0,2}$ или: $N_e = \frac{1}{951 \cdot 100} n^{0,4} \cdot b \cdot S^{0,6} \cdot f^{0,8} \cdot Z^{0,4} \cdot D^{0,2}$	$N_c = \frac{2^{0,55}}{1,55} \cdot \frac{50}{4500 \cdot 1000} n^{0,45} \cdot b \cdot S^{0,55} \cdot f^{0,775} \cdot Z^{0,45} \cdot D^{0,225}$ или: $N_e = \frac{1}{951 \cdot 100} n^{0,45} \cdot b \cdot S^{0,55} \cdot f^{0,775} \cdot Z^{0,45} \cdot D^{0,225}$
2. Чугун $H=140$	$N_e = \frac{2^{0,61}}{1,61} \cdot \frac{60}{4500 \cdot 1000} n^{0,39} \cdot b \cdot S^{0,61} \cdot f^{0,805} \cdot Z^{0,39} \cdot D^{0,195}$ или: $N_e = \frac{1}{792 \cdot 100} n^{0,39} \cdot b \cdot S^{0,61} \cdot f^{0,805} \cdot Z^{0,39} \cdot D^{0,195}$	$N_e = \frac{2^{0,55}}{1,55} \cdot \frac{60}{4500 \cdot 1000} n^{0,45} \cdot b \cdot S^{0,55} \cdot f^{0,775} \cdot Z^{0,45} \cdot D^{0,225}$ или: $N_e = \frac{1}{794 \cdot 100} n^{0,45} \cdot b \cdot S^{0,55} \cdot f^{0,775} \cdot Z^{0,45} \cdot D^{0,225}$
3. Чугун $H=170$	$N_e = \frac{2^{0,66}}{1,66} \cdot \frac{75}{4500 \cdot 1000} n^{0,34} \cdot b \cdot S^{0,66} \cdot f^{0,83} \cdot Z^{0,34} \cdot D^{0,17}$ или: $N_e = \frac{1}{630 \cdot 100} n^{0,34} \cdot b \cdot S^{0,66} \cdot f^{0,83} \cdot Z^{0,34} \cdot D^{0,17}$	$N_e = \frac{2^{0,6}}{1,6} \cdot \frac{75}{4500 \cdot 1000} n^{0,4} \cdot b \cdot S^{0,6} \cdot f^{0,8} \cdot Z^{0,4} \cdot D^{0,2}$ или: $N_e = \frac{1}{634 \cdot 100} n^{0,4} \cdot b \cdot S^{0,6} \cdot f^{0,8} \cdot Z^{0,4} \cdot D^{0,2}$
4. Чугун $H=190$	$N_e = \frac{2^{0,71}}{1,71} \cdot \frac{100}{4500 \cdot 1000} n^{0,29} \cdot b \cdot S^{0,71} \cdot f^{0,855} \cdot Z^{0,29} \cdot D^{0,145}$ или: $N_e = \frac{1}{471 \cdot 100} n^{0,29} \cdot b \cdot S^{0,71} \cdot f^{0,855} \cdot Z^{0,29} \cdot D^{0,145}$	$N_e = \frac{2^{0,65}}{1,65} \cdot \frac{100}{4500 \cdot 1000} n^{0,35} \cdot b \cdot S^{0,65} \cdot f^{0,825} \cdot Z^{0,35} \cdot D^{0,175}$ или: $N_e = \frac{1}{474 \cdot 100} n^{0,35} \cdot b \cdot S^{0,65} \cdot f^{0,825} \cdot Z^{0,35} \cdot D^{0,175}$

Обрабатываемый материал	Уравнение мощности для острой фрезы	Уравнение мощности для средне-пригупленной фрезы
5. Сталь мягкая $K_z = 34$ и средней твердости $K_z = 76$	$N_e = \frac{2^{0,7}}{1,7} \cdot \frac{142}{4500 \cdot 1000} \cdot n^{0,3} \cdot b \cdot S^{0,7} \cdot f^{0,85} \cdot Z^{0,3} \cdot D^{0,15}$ или: $N_e = \frac{1}{332 \cdot 100} \cdot n^{0,3} \cdot b \cdot S^{0,7} \cdot f^{0,85} \cdot Z^{0,3} \cdot D^{0,15}$	$N_e = \frac{2^{0,67}}{1,67} \cdot \frac{142}{4500 \cdot 1000} \cdot n^{0,33} \cdot b \cdot S^{0,67} \cdot f^{0,835} \cdot Z^{0,33} \cdot D^{0,165}$ или: $N_e = \frac{1}{332 \cdot 100} \cdot n^{0,33} \cdot b \cdot S^{0,67} \cdot f^{0,835} \cdot Z^{0,33} \cdot D^{0,165}$
6. Сталь твердая $K_z = 76$	$N_e = \frac{2^{0,74}}{1,74} \cdot \frac{180}{4500 \cdot 1000} \cdot n^{0,26} \cdot b \cdot S^{0,74} \cdot f^{0,87} \cdot Z^{0,26} \cdot D^{0,13}$ или: $N_e = \frac{1}{260 \cdot 100} \cdot n^{0,26} \cdot b \cdot S^{0,74} \cdot f^{0,87} \cdot Z^{0,26} \cdot D^{0,13}$	$N_e = \frac{2^{0,71}}{1,71} \cdot \frac{180}{4500 \cdot 1000} \cdot n^{0,29} \cdot b \cdot S^{0,71} \cdot f^{0,855} \cdot Z^{0,29} \cdot D^{0,145}$ или: $N_e = \frac{1}{261 \cdot 100} \cdot n^{0,29} \cdot b \cdot S^{0,71} \cdot f^{0,855} \cdot Z^{0,29} \cdot D^{0,145}$
7. Сталь хроми- стая $K_z = 74$	$N_e = \frac{2^{0,77}}{1,77} \cdot \frac{205}{4500 \cdot 1000} \cdot n^{0,23} \cdot b \cdot S^{0,77} \cdot f^{0,885} \cdot Z^{0,23} \cdot D^{0,115}$ или: $N_e = \frac{1}{228 \cdot 100} \cdot n^{0,23} \cdot b \cdot S^{0,77} \cdot f^{0,885} \cdot Z^{0,23} \cdot D^{0,115}$	$N_e = \frac{2^{0,74}}{1,74} \cdot \frac{205}{4500 \cdot 1000} \cdot n^{0,26} \cdot b \cdot S^{0,74} \cdot f^{0,87} \cdot Z^{0,26} \cdot D^{0,13}$ или: $N_e = \frac{1}{228 \cdot 100} \cdot n^{0,26} \cdot b \cdot S^{0,74} \cdot f^{0,87} \cdot Z^{0,26} \cdot D^{0,13}$
8. Алюминий литой $H=60$	$N_e = \frac{2^{0,78}}{1,78} \cdot \frac{53}{4500 \cdot 1000} \cdot n^{0,22} \cdot b \cdot S^{0,78} \cdot f^{0,89} \cdot Z^{0,22} \cdot D^{0,11}$ или: $N_e = \frac{1}{881 \cdot 100} \cdot n^{0,22} \cdot b \cdot S^{0,78} \cdot f^{0,89} \cdot Z^{0,22} \cdot D^{0,11}$	$N_e = \frac{2^{0,76}}{1,76} \cdot \frac{53}{4500 \cdot 1000} \cdot n^{0,24} \cdot b \cdot S^{0,76} \cdot f^{0,88} \cdot Z^{0,24} \cdot D^{0,12}$ или: $N_e = \frac{1}{883 \cdot 100} \cdot n^{0,24} \cdot b \cdot S^{0,76} \cdot f^{0,88} \cdot Z^{0,24} \cdot D^{0,12}$

тироваться на угол поднутрения, в плоскости нормальной к режущей кромке зуба. Можно предположить, что влияние поднутрения на спиральном

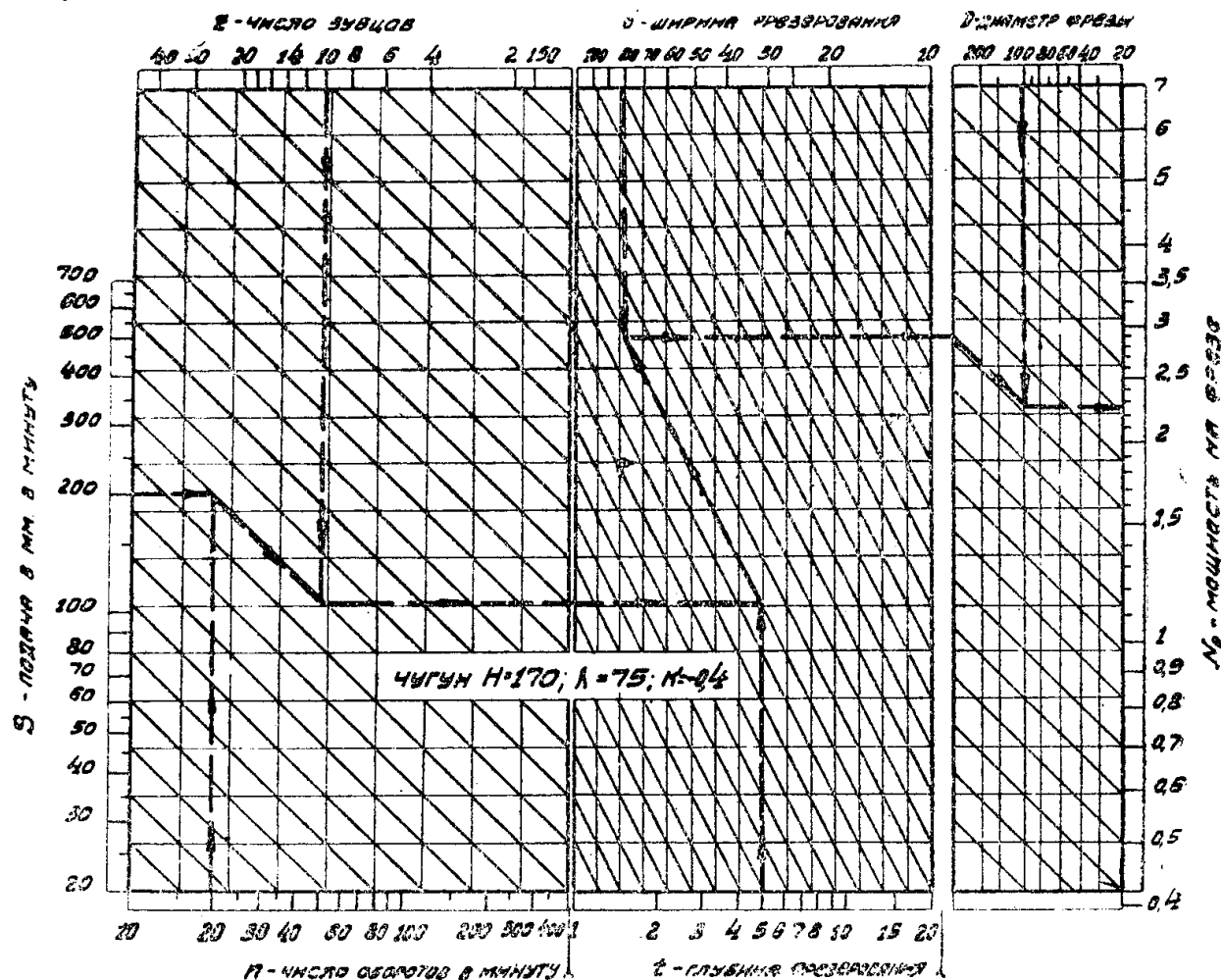


Рис. 37.

зубе будет несколько значительнее, чем нами определенное, в силу того, что стружка при своем движении, отклоняясь от направления, нормального кромке зуба, будет тем самым изменять фактический угол резания, но судя по данным Глебова³⁹⁾ это изменение будет настолько незначительным, что не даст заметного понижения мощности.

Для подсчета мощности при заданном режиме можно пользоваться и рис. 36. Для этого нужно, зная S , n , Z , t и D , определить S_m , затем для полученного S_m найти по рис. 36 соответствующее значение A_w для заданного обрабатываемого материала, умножить это значение на $b \cdot S \cdot t$ и разделить на $4500 \cdot 1000$. В случае ориентировки на острую фрезу для этого нужно пользоваться соответствующими прямыми из рис. 17, 18, 19, 20, 24, 27, 28, 33 и 35.

Заключение.

На основе проделанной работы можем сделать следующие заключения:

1. Все теоретические выводы и положения, выдвинутые нами в „Теории работы цилиндрической фрезы со спиральным зубом“²⁴⁾ полностью подтверждаются экспериментом.

2. Мощность на фрезе определяется уравнением 1 и табл. 11.

3. Толщина стружки на прямом и спиральном зубе выражается зависимостью:

$$S_e = S_z \cdot \sin \psi.$$

Никакого влияния угол подъема спирали β на толщину стружки не оказывает.

4. Сечение стружки на спиральном зубе выражается зависимостью

$$q = \frac{D}{2} \cdot \frac{S_z}{\cos \beta} (\cos \psi_1 - \cos \psi_2).$$

5. Окружная сила на спиральном зубе фрезы выражается зависимостью

$$F = D \cdot \lambda \cdot S_z^{k+1} \cdot \operatorname{tg} \beta \frac{2^{k+1}}{K+2} \cdot \left[\sin^{k+2} \left(\frac{\psi_2}{2} \right) - \sin^{k+2} \left(\frac{\psi_1}{2} \right) \right]$$

6. Угол подъема спирали β никакого влияния на расход работы и на среднюю мощность при фрезеровании не оказывает.

7. Выводы проф. Саввина не подтверждаются экспериментом и приводят к значительным ошибкам, выражающимся в некоторых случаях сотнями процентов отклонения.

Более широкого сравнения результатов нашей работы с существующими экспериментальными данными мы сделать не могли, в виду получившегося значительного объема настоящей статьи.

Работа была проведена в лаборатории резанья металлов Томского Индустриального Института за счет кредитов ГУУЗ НКТП.

Томск, май 1935 года.

Литература, на которую в статье имеются ссылки:

1. Engel. Über Schnittgeschwindigkeit und Schnittdruck beim Fräsen. Z. d. V. D. I. 1925 s—819.
2. Резников. Теория резанья металлов. 1934 г., стр. 208 и далее.
3. Schütte-Blätter für den Betrieb. 1910. Die de Leeuvchen Versuche an Cincinnati-Hochleistungsfräsmaschinen.
4. Reindl. Vergleichende Fräsversuche mit Walzenfräsern Schütte-Blätter für den Betrieb 1911. N 1.
5. Airey-Oxford. On the Art of Milling. Mech. Eng. 1921 p. 783.
6. Sawin. Theorie of Milling Cutters. Mach. Eng. 1926 p.—1203.
7. Sawin. Genie Civil 1925.
8. Beckh. Die Metallbearbeitung mittels Walzenfräsern. Maschinenbau 1926. S—497.
9. Salomon. Die Fräsarbeit. Werkstattstechnik 1926, s—469.
10. Salomon. Zur Theorie des Fräsvorganges. Z. d. v. D. I. 1928.
11. Bahlecke. Richtwerte für das Fräsen mit Walzenfräsern Maschinenbau 1930. S—437.
12. Eisele. Dynamische Untersuchungen des Fräsvorganges. Berichte über betriebswissenschaftliche Arbeiten. N 7 1931.
13. Schlesinger. Werkstattstechnik 1931 № 17.
14. Stoewer. Maschinenbau 1932 № 23.
15. Беспрозванный. Влияние режима работы и конструкции вальцевого фрезера на усилие и расход энергии. Орг-Информация 1933 № 5.
16. Boston and Kraus. The Elements of Milling. A. S. M. E. Transactions. Vol. 54. 1932.
17. Brödner. Neuere Untersuchungen des Fräsvorganges Z. d. V. D. I. 1933. S—1113.
18. Schröder. Die Bedeutung der Spandicke bei Walzenfräsern. Maschinenbau 1934. S—541.
19. „ЭНИМС“. Выпуск № 9. 1934 г. Фрезы и фрезерование.
20. Гувернер. Фрезерное дело. 1934. Стр. 267—303.
21. Fischer. Die Werkzeugmaschine 1900.
22. Stoewer. Richtlinien für Wirtschaftliches Fräsen. Maschinenbau 1934. S—11.
23. Соколов. Инструментальное дело. Стр. 146. 1933 г.
24. Кривоухов. Обработка металлов резаньем.
25. Исаев. Холодная обработка металлов.
26. Сафонов и Новиков. Технормирование 1935. № 2.
27. Розенберг и Суднишников. Теория работы цилиндрической фрезы со спиральным зубом. Вестник металлопромышленности. 1933. № 4.
28. Salomon. Trägheitslöse Zerspanungsmessungen. Loewe-Notizen Bd. 14. 1929. S—118.
29. Eisele. Beschreibung und Kritik der bisher veröffentlichten Schnittdruckmessenrichtungen für Fräsmaschinen. Maschinenbau 1931.
30. Kurrein. Fräser und Fräsmaschine. Werkstattstechnik 1929 № 9. Werkstattstechnik 1928. S—33.

28. Schlesinger. Wechselwirkung zwischen Werkstoff und Werkzeug Werkstattstechnik 1927. S—605.
- Schlesinger. Messungen bei Zerspanungsversuche an Fräsmaschine. Werkstattstechnik 1930. S—102.
29. Аврутин. Условия резанья и конструкция фрез. Стр. 16.
30. Okochi a Okoshi. Scientific paper of the Inst of Physical and Chemical Research N 84. Maschinenbau 1929. S—318.
- Глебов. Теория наивыгоднейшего резанья. Стр. 197.
31. Сафонов и Новиков. О скоростях фрезерования. Технормирование 1933 № 9.
32. Иванов. Фрезерные работы. Вестник Металлопромышленности 1934 № 11.
33. Соколов. Инструментальное дело. Стр. 155.
34. Еремин. Толщина стружки на зубе цилиндрической фрезы. Технормирование 1934 № 2
35. Даниленко. Технормирование 1935 № 2.
36. Резников. Теория резанья металлов. Стр. 222.
37. Сборник руководящих материалов Гипромаша. Режимы резанья на фрезерных станках. Серия II. Выпуск 34. 1934 г. Стр. 17, табл. 5
38. Schlesinger. Versuche über die Leistung von Schleifscheiben. Mitteilungen über Forschungsarbeiten 1907. № 5.
38. Кенен. Элементы станков. Стр. 18, табл. 5.
- Джигит. Шлифовальное дело. Стр. 19, табл. 18.
39. Глебов. Теория наивыгодн. резанья. Стр. 75, табл. 10.

SUMMARY.

In spite of a considerable amount of works devoted to the investigation of the process of milling, there is no sufficient clearness in the question of the influence of various factors on the expenditure of work during the milling.

The less explained is the question of the helix angle of the cutters tooth affecting the energy of milling. Bahlecke⁸⁾, Eisele⁹⁾, Schlesinger¹⁰⁾, Brödner¹⁴⁾, Experiments of the University in Michigan¹⁶⁾, Saffonov and Novikov²³⁾ indicate the absence of the influence of the angle of helix lifting upon the expenditure of work; Stoewer¹¹⁾¹⁹⁾ indicates the increase of the expenditure of work with the diminution of the helix lifting; Beckh⁶⁾, Sawin⁵⁾, Sokolov²⁰⁾, Reznikov¹⁾, Kri-voukhov²¹⁾, Issaev²²⁾ assert the opposite.

The author of this work published in 1933 the theory of work of a plain milling cutter with a helical tooth²⁴⁾; in this work a connection among all factors of cutting during the milling was given and it was proved theoretically, that the expenditure of work during the milling with a plain milling cutter does not depend on the helix angle of the tooth.

The purpose of the present work was to verify experimentally the theory suggested by the author as well as to determine characteristics of different materials in milling, entering into the equation of the milling energy.

This whole work was performed parallelly using two experimental methods. By means of a special pendulum actuated milling dynamometer (see fig. 1 and 2) the expenditure of work on the removal of one chip with one tooth of the cutter was determined and besides that by means of a dynamometer installed into the construction of the milling machine (see fig. 7 and 8) the turning moments on the cutter of the work with different working regimes were recorded. The exact coincidence of both methods gave a complete assurance in the reliability of the conclusions.

The whole apparatus was carefully examined, possible errors were determined and were taken into consideration in working out the experimental data.

The cutters used during the work with the pendulum actuated dynamometer are represented in the table 2 and on the fig. 6. The cutters used during the work on the milling machine are represented in the table 3 and on the fig. 13.

The materials which were used in the tests are represented in the table 4. 3500 tests were performed and they confirmed fully the author's theory, showed a mutual connection between different factors of cutting and the expenditure of work as well as they measured the influence of the rake angle and the influence of dulling of the cutter upon the expenditure of work.

The tables 7 and 9 afford the values of quantities entering into the equation of energy (1).

Fig. 15—20 are related to the table 7.

Fig. 23—35 to the table 9.

Table 8 shows the influence of the rake angle.

Table 11 affords the equations of the expenditure of energy in case of work with different materials in milling with a sharp cutter and with a slightly dull one.

The work was performed in the Laboratory of Cutting of Metals of the Industrial Institute in Tomsk and was finished in May 1935.