

НЕРАВНОМЕРНОСТЬ ПРИ ФРЕЗЕРОВАНИИ.

Доцент А. М. Розенберг.

Известно, что производительность работы резания, выраженная через объем снятой в единицу времени стружки, растет с увеличением толщины снимаемой стружки (при всех прочих постоянных условиях). Это обстоятельство должно учитываться при обдирочных режимах, когда основной задачей является удаление возможно большего объема стружки в единицу времени.

При процессе фрезерования как цилиндрическим, так и лобовым фрезером это имеет не меньшее значение, чем при других видах работы резания.

В этом нетрудно убедиться по рис. 1, где приведена экспериментально полученная зависимость удельной работы A_w , расходуемой на сьем еди-

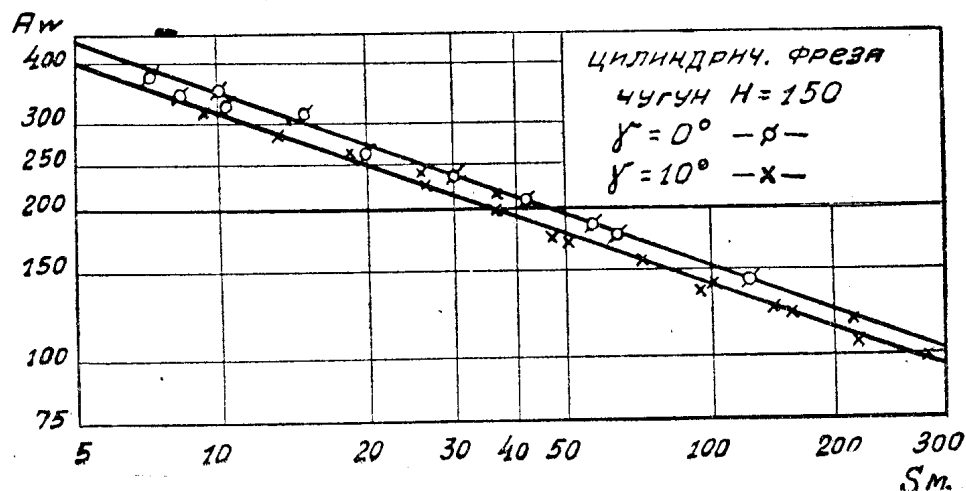


Рис. 1.

ницы объема стружки, от срединной толщины стружки S_m (в микронах) при фрезеровании чугуна $H_s = 150$.

Подобные же графики были получены автором экспериментально и для других металлов^{1, 2}).

Все они указывают на то, что удельная работа при увеличении срединной толщины стружки при фрезеровании заметно уменьшается, т. е., что работая с более толстой стружкой, затратив ту же самую работу, мы снимем больший объем стружки, или иначе, расходуя ту же имеющуюся в нашем распоряжении мощность, получим большую производительность.

По приведенному рис. 1 видно, что, переходя от $S_m = 10$ микронов к $S_m = 100$ микронов (и то и другое возможно осуществить при обдирочной работе), мы снижаем удельную работу более чем в два раза, т. е. увеличиваем производительность в такое же число раз, не повышая расхода энергии.

Вопроса стойкости инструмента мы совершенно не касаемся, считая, что стойкость инструмента во всех случаях обеспечивает выбранный ре-

жим. Отсюда правило наибольшей производительности при обдирочном фрезеровании может быть сформулировано так:

Наибольшая возможная производительность на данном станке может быть получена при полном использовании мощности станка и при работе в то же время с возможно более толстыми стружками.

При выборе обдирочного режима при фрезеровании обычно глубина фрезерования (толщина снимаемого слоя) t и ширина фрезерования b являются заданы и, если считать заданным и инструмент (число зубцов — z , диаметр D), то загрузить мощность станка полностью можно, выбирая различные комбинации числа оборотов n и подачи на один зуб S_z , причем вполне естественно большая производительность будет в случае выбора возможно большей подачи S_z и соответствующего при этом значения подачи числа оборотов n из условия использования мощности N_e .

При увеличении подачи будет увеличиваться производительность, но параллельно с этим будет увеличиваться силовая нагрузка на инструменте и в передаточных механизмах станка. Для каждого станка существует и может быть определен предел увеличения крутящего момента на фрезере и суммарной окружной силы. Этот предел обуславливается прочностью деталей главного привода шпинделя и привода механизма подачи.

При выборе режима максимальной производительности необходимо учитывать действительную нагрузку звеньев привода станка, с тем, чтобы не допустить их перегрузки.

Вопрос учета действующих нагрузок усложняется в данном случае тем, что окружная сила и крутящий момент на фрезере в общем случае не являются величиной постоянной во времени, а претерпевают по мере прохода зуба под стружкой более или менее значительные колебания. Эти колебания, обуславливаемые геометрией процесса резания и переменностью удельного давления резания при фрезеровании, имеют место как при работе торцевых, так и при работе цилиндрических фрезеров. Переменность силы и крутящего момента (неравномерность) может создать неблагоприятные условия при работе на фрезерном станке, вызывая вибрации в отдельных частях станка, влияя на чистоту обрабатываемой поверхности и на стойкость фрезера, тем самым снижая производительность. Кроме того сила и крутящий момент, переходя zn раз в минуту через все свои мгновенные значения, при своих максимумах могут значительно перегружать отдельные звенья передач станка, приводя тем самым к быстрому их износу, а в некоторых случаях и к поломкам.

Ряд работ теоретического и экспериментального характера³⁾ имели целью изучение вопросов неравномерности, но полученные при этом выводы не дают возможности просто определить максимум силы и крутящего момента на фрезере для выбранного режима.

Среднюю окружную силу и средний крутящий момент не представляет затруднения определить, предварительно найдя графически или аналитически мощность на шпинделе N_e для выбранного режима. При этом

$$P_{cp} = \frac{4500 N_e}{v} \text{ кг}$$

$$M_{cp} = 716, 2 \frac{N_e}{n} \text{ кгм.}$$

Но максимум этих величин, повторяющийся zn раз в минуту, может значительно превосходить среднее значение их. Ориентировка при выборе режима на средние значения этих величин недопустима, так как это регламентировало бы периодическую перегрузку звеньев станка, особенно значительную при лобовом фрезеровании, где, как мы покажем дальше,

максимум силы и крутящего момента в некоторых случаях может превосходить средние значения их в несколько раз.

Отношение максимальной суммарной окружной силы $(\Sigma P_{окр})_{max}$ к средней $P_{ср}$ назовем коэффициентом неравномерности μ .

$$\mu = \frac{(\Sigma P_{окр})_{max}}{P_{ср}} = \frac{M_{max}}{M_{ср}}.$$

Если для выбранного режима наряду с легко определяемым $P_{ср}$ или $M_{ср}$ будет известна и величина μ , мы просто сможем определить $(\Sigma P_{окр})_{max}$ и M_{max} и будем иметь все необходимое для суждения о допустимости выбранного режима как с точки зрения использования мощности станка, так и с точки зрения нагрузки его передаточных механизмов.

I. Неравномерность при лобовом фрезеровании.

При лобовом фрезеровании, когда ширина фрезеруемой поверхности b равна или меньше диаметра фрезера D и расположена симметрично относительно фрезера, уравнение мощности на фрезере будет ²⁾:

$$N_e = \frac{2^{-\frac{\kappa}{2}} \lambda n^{-\kappa}}{1000 \cdot 4500} \cdot S^{\kappa+1} \cdot t^{l+1} \cdot Z^{-\kappa} \cdot D \cdot \left[1 - \left(1 - \frac{b}{D} \right)^{\frac{\kappa+2}{2}} \right] \quad (1)$$

отсюда средняя окружная сила

$$P_{ср} = \frac{4500 N_e}{v} = \frac{2^{-\frac{\kappa}{2}}}{\pi} \lambda \cdot S_z^{\kappa+1} \cdot t^{l+1} \cdot z \cdot \left[1 - \left(1 - \frac{b}{D} \right)^{\frac{\kappa+2}{2}} \right] \quad (2)$$

Здесь: λ — величина, зависящая от обрабатываемого материала, профиля зуба фрезера.

n — число оборотов в минуту.

t — глубина фрезерования в мм.

S — подача в мм в минуту.

Z — число зубцов фрезера.

S_z — подача на один зуб фрезера.

D — диаметр фрезера.

b — ширина фрезерования в мм.

k, l — показатели, характеризующие обрабатываемый материал.

Окружная сила на лобовом фрезере для данного мгновенного положения зубьев его

$$\Sigma P_{окр} = \lambda \cdot S_z^{\kappa+1} \cdot t^{l+1} \Sigma \sin^{\kappa+1} \psi \quad (3)$$

отсюда

$$\mu = \frac{(\Sigma P_{окр})_{max}}{P_{ср}} = \frac{\pi \left(\Sigma \sin^{\kappa+1} \right)_{max}}{2^{-\frac{\kappa}{2}} Z \left[1 - \left(1 - \frac{b}{D} \right)^{\frac{\kappa+2}{2}} \right]} \quad (4)$$

Таким образом, коэффициент неравномерности μ является функцией $\frac{b}{D}$ и Z . Эти две величины (при $k = const$) полностью определяют значе-

ния μ , так как $(\sum \sin^{\kappa+1} \psi)_{max}$ также является функцией этих двух величин.

При любом отношении $\frac{b}{D}$, максимальную сумму синусов (а значит и максимальную суммарную окружную силу) мы будем иметь в том случае, если на данной ширине b расположим под стружкой наибольшее возможное количество зубьев, причем расположим их симметрично относительно оси изделия. Такое положение показано на рис. 2 для двенадцати зубого фрезера ($Z=12$) при $b=b_1$. Подсчитав для этого случая

$$(\sum \sin^{\kappa+1} \psi)_{max} = \sin^{\kappa+1} \psi_1 + \sin^{\kappa+1} \psi_2 + \sin^{\kappa+1} \psi_3 + \sin^{\kappa+1} \psi_4,$$

и подставив все величины в выражение 4, мы получим коэффициент неравномерности μ , который покажет во сколько раз максимальная сум-

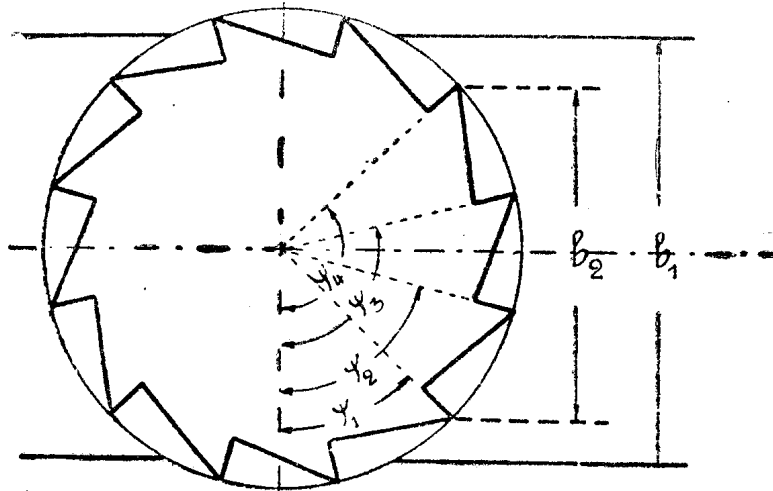


Рис. 2.

марная окружная сила будет больше средней окружной силы для данного случая фрезерования.

Если мы для данного случая ($Z=12$) начнем постепенно уменьшать ширину фрезерования b_1 , то знаменатель дроби в выражении 4 будет постепенно уменьшаться, числитель же будет оставаться постоянным до тех пор, пока ширина фрезерования не станет равной b_2 . При этом изменении ширины от b_1 до b_2 коэффициент неравномерности μ будет постепенно возрастать. Под стружкой будет находиться 4 зуба (в момент $(\sum P)_{max}$).

Если и дальше уменьшать ширину фрезерования, то как только она станет меньше b_2 , под стружкой смогут поместиться лишь три зуба. Положение соответствующее $(\sum \sin^{\kappa+1} \psi)_{max}$ будет соответствовать рис. 3 и в числитель дроби выражения 4 должно быть подставлено

$$(\sum \sin^{\kappa+1} \psi)_{max} = \sin^{\kappa+1} \psi_I + \sin^{\kappa+1} \psi_{II} + \sin^{\kappa+1} \psi_{III}.$$

В момент перехода ширины фрезерования (при ее уменьшении) через значение b_2 числитель выражения 4, оставшийся постоянным, сразу уменьшается, так как

$$\begin{aligned} \sin^{\kappa+1} \psi_I + \sin^{\kappa+1} \psi_{II} + \sin^{\kappa+1} \psi_{III} < \sin^{\kappa+1} \psi_1 + \sin^{\kappa+1} \psi_2 + \\ + \sin^{\kappa+1} \psi_3 + \sin^{\kappa+1} \psi_4 \end{aligned}$$

и коэффициент μ , постепенно увеличивавшийся, в этот момент скачком снизит свое значение. При дальнейшем уменьшении ширины фрезерования в пределах между b_2 и b_3 , мы будем иметь опять постепенное уменьшение знаменателя при постоянном числителе, т. е. постепенное увеличение μ . Когда ширина фрезерования достигнет значения b_3 , мы будем иметь опять внезапное уменьшение μ и т. д.

Такой скачкообразный процесс изменения μ с изменением $\frac{b}{D}$ представлен для ряда значений Z на рис. 4—17.

Из сравнения этих рисунков видно, что с увеличением Z увеличивается число скачков μ , но уменьшается абсолютное значение, которого достигает коэффициент неравномерности при скачке.

Не трудно заметить, что скачки коэффициента неравномерности происходят при значениях $\frac{b}{D}$, удовлетворяющих условию:

$$\frac{b}{D} = \sin\left(\frac{m}{2} \cdot \frac{360^\circ}{Z}\right),$$

где m — наибольшее число зубцов фрезера, помещающееся под стружкой при данном отношении $\frac{b}{D}$.

Число скачков μ для каждого Z будет равно в случае четного числа зубцов $\frac{Z}{2} - 1$, в случае нечетного числа зубцов $\frac{Z}{2} + \frac{1}{2}$.

Из рисунков 4—17 видно, что при малом числе зубцов у фрезера величина коэффициента неравномерности μ достигает высоких значений, т. е. максимальная сила на фрезере в этом случае значительно (в несколько раз) превосходит среднюю ее величину.

Из рисунка 9, например, видно, что значения μ могут быть достаточно велики даже при $Z = 10$; так при $\frac{b}{D} = 0,311$ $\mu = 2$; это значит, что максимальная суммарная окружная сила и максимальный крутящий момент превосходят средние значения этих величин в два раза. При $\frac{b}{D} = 0,59$ $\mu = 1,45$. Колебания же нагрузки на фрезере, т. е. отношение максимальных значений сил и моментов к их минимальным значениям будет еще более велико.

Из рис. 9 также видно, что если мы изменением диаметра фрезера при заданной ширине фрезерования изменим отношение $\frac{b}{D}$ с $\frac{b}{D} = 0,311$ до $\frac{b}{D} = 0,30$, то этим простым мероприятием мы снижаем значение μ с $\mu = 2$ до $\mu = 1,08$, т. е. практически получаем совершенно равномерную нагрузку фрезера за счет чего безусловно можно увеличить производительность путем увеличения подачи фрезера.

Если в первом случае при $\frac{b}{D} = 0,311$ максимальная суммарная окружная сила на фрезере превосходит минимальную в несколько раз, что безусловно вызовет при высоких скоростях резания беспокойную работу станка, то при $\frac{b}{D} = 0,3$ мы будем иметь практически постоянную по величине нагрузку фрезера.

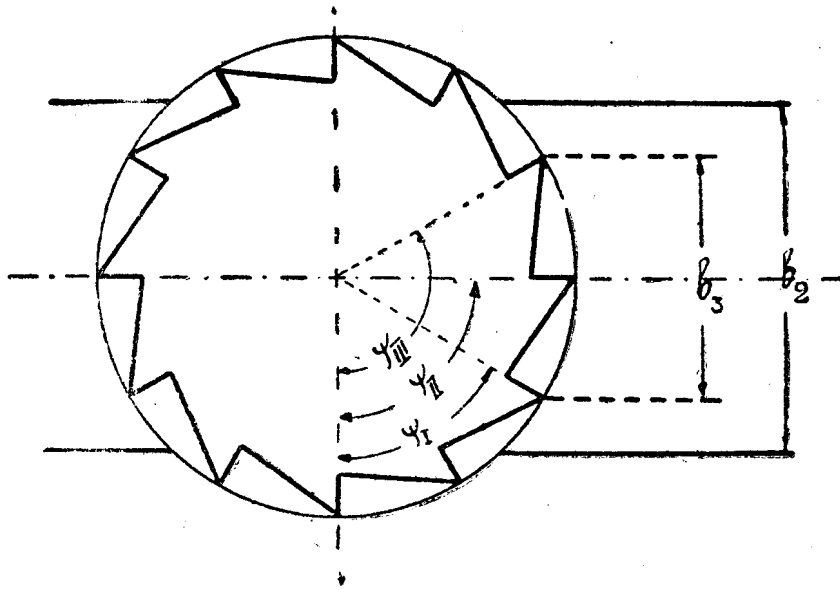


Рис. 3.

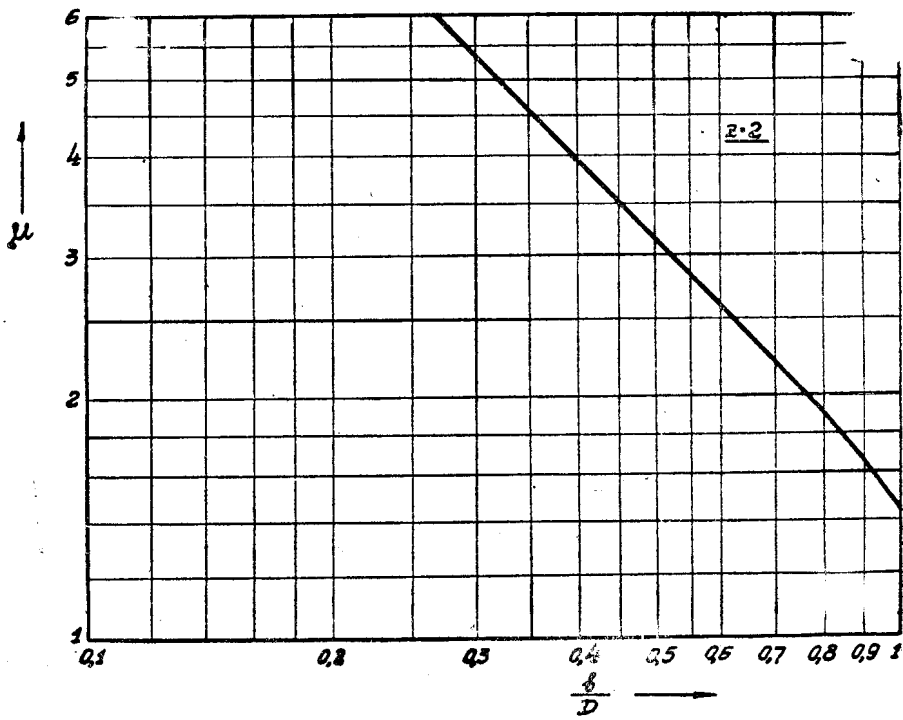


Рис. 4.

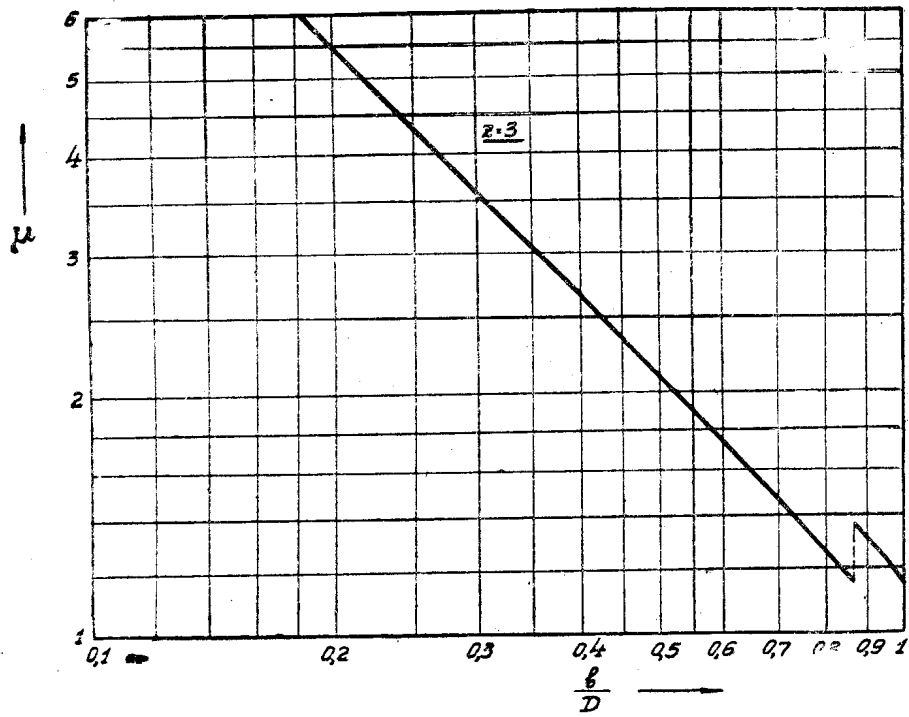


Рис. 5.

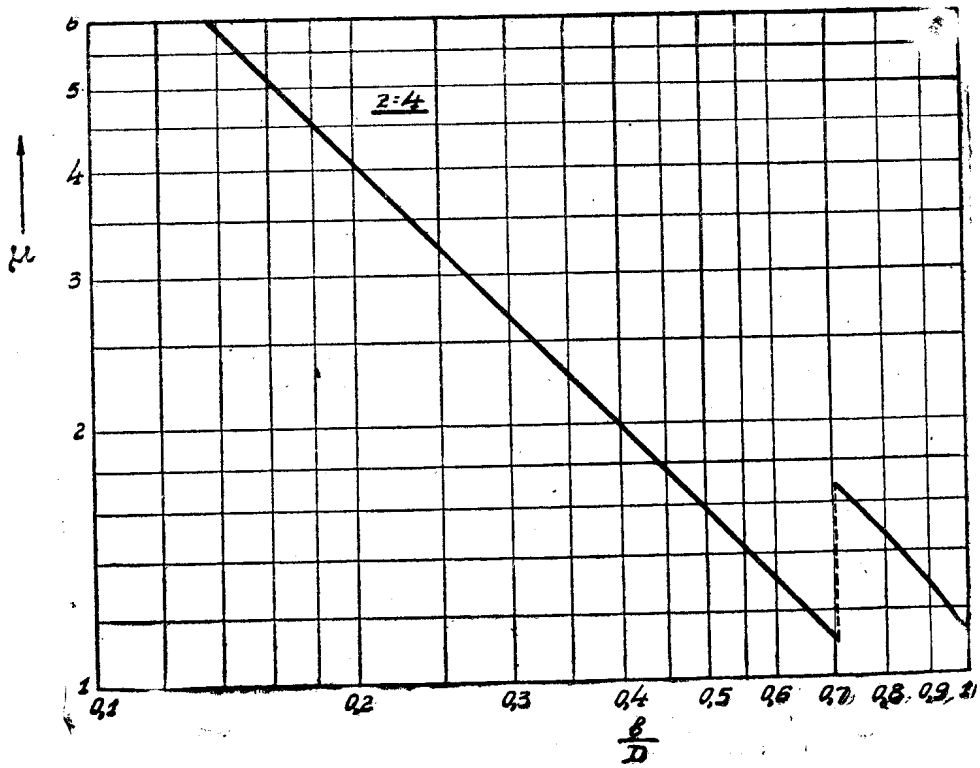


Рис. 6.

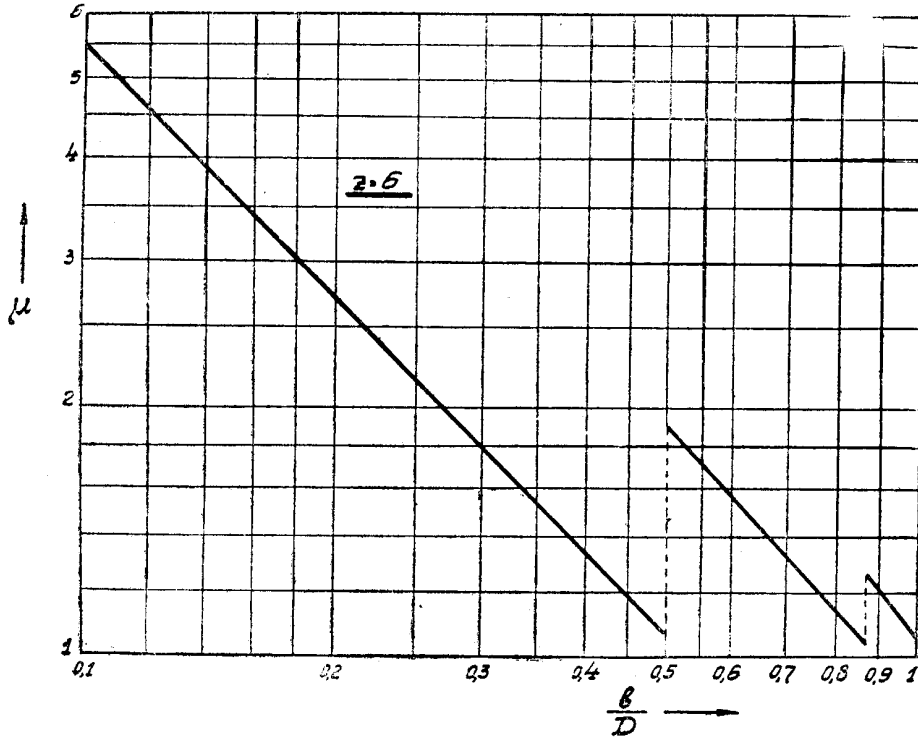


Рис. 7.

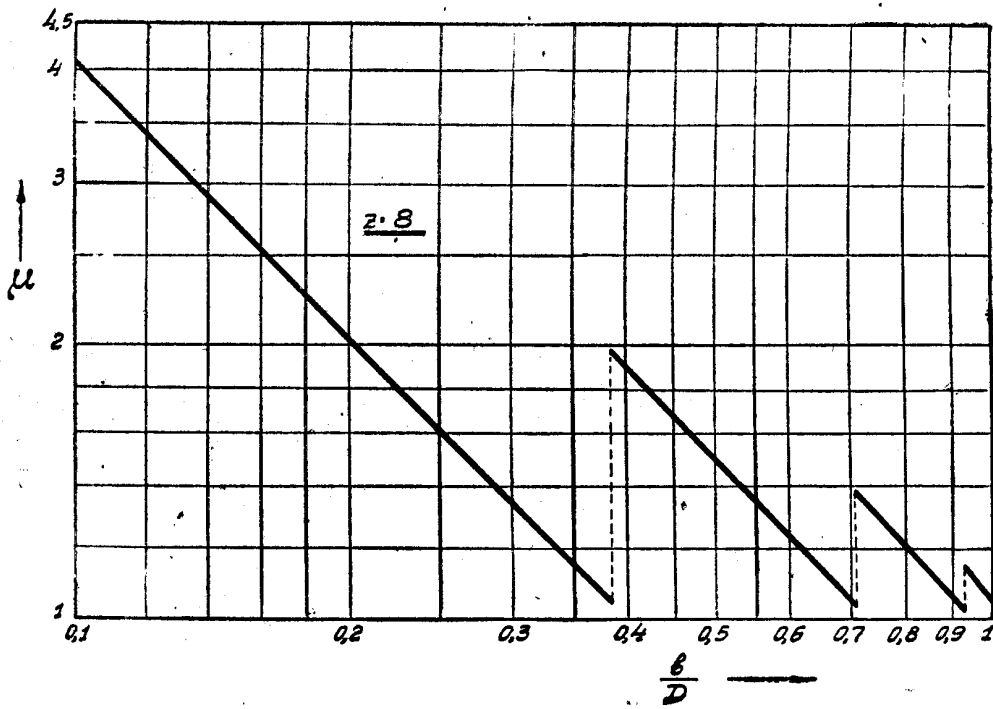


Рис. 8.

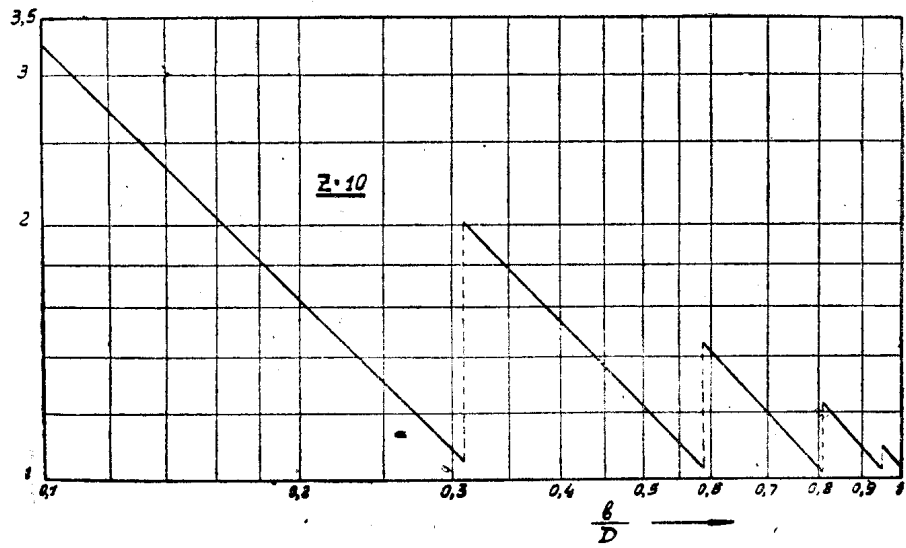


Рис. 9.

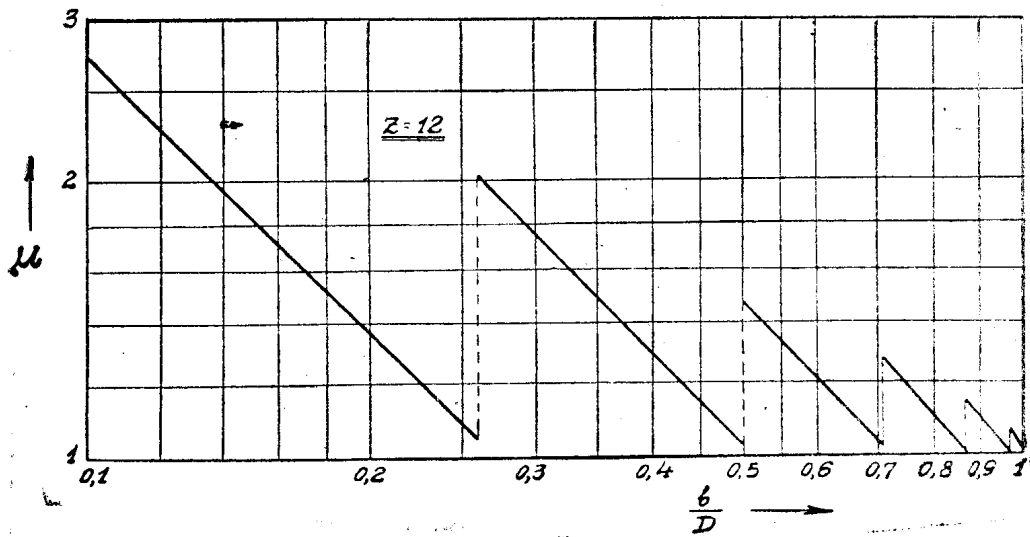


Рис. 10.

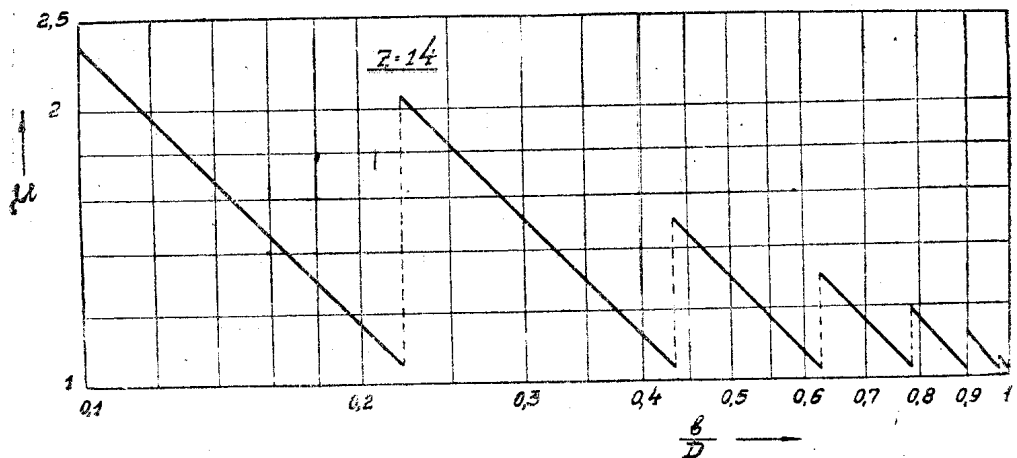


Рис. 11.

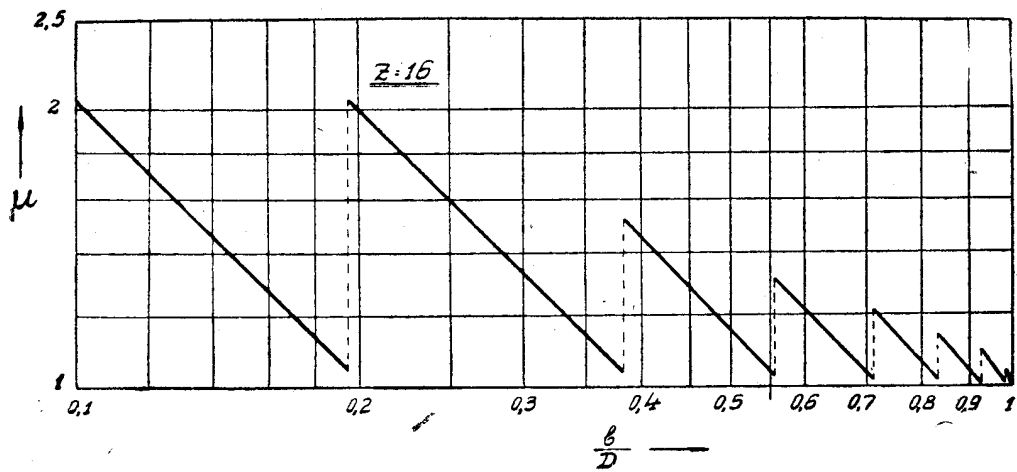


Рис. 12.

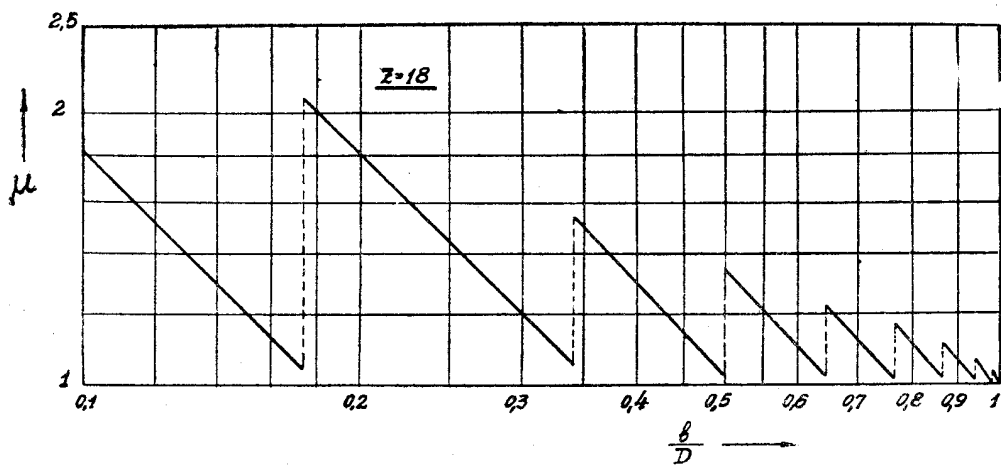


Рис. 13.

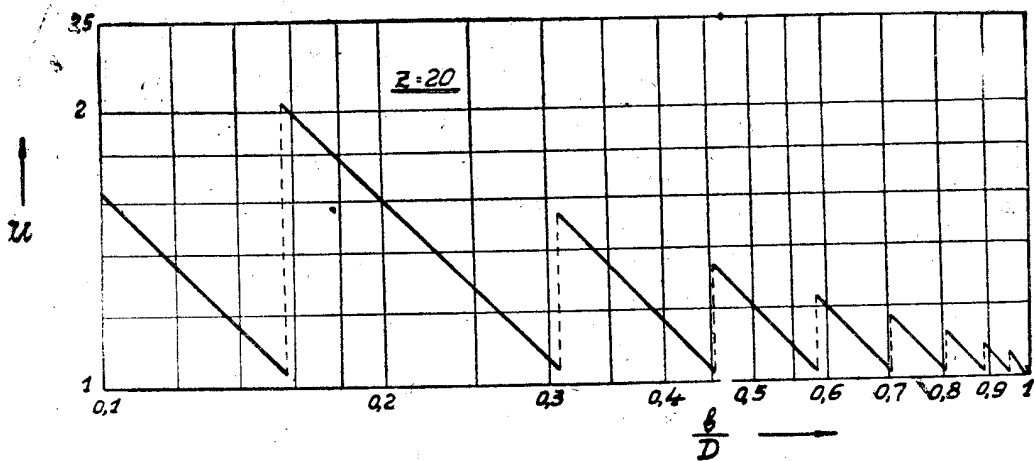


Рис. 14.

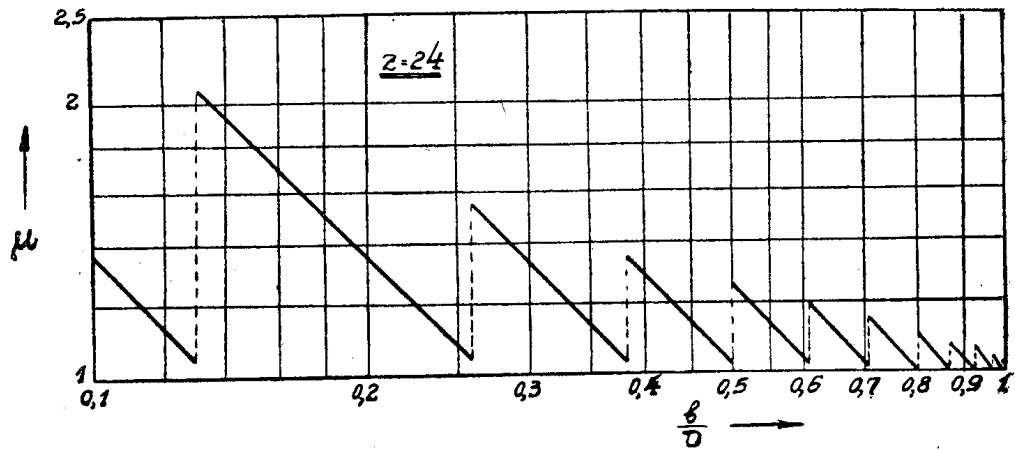


Рис. 15.

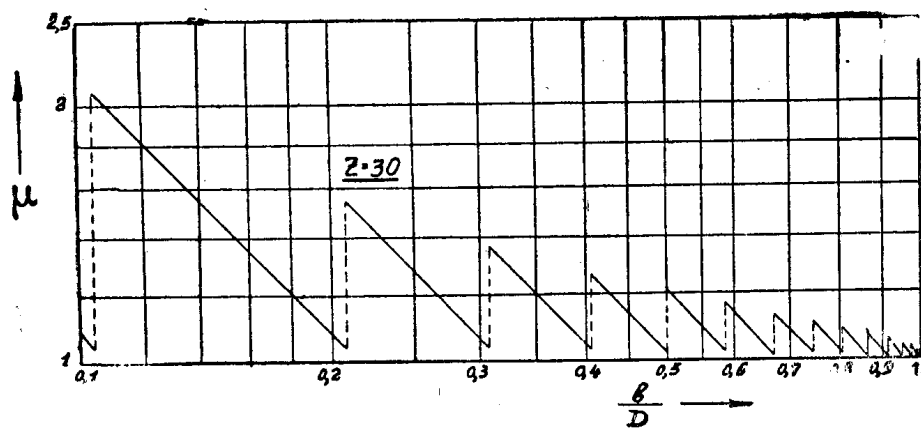


Рис. 16.

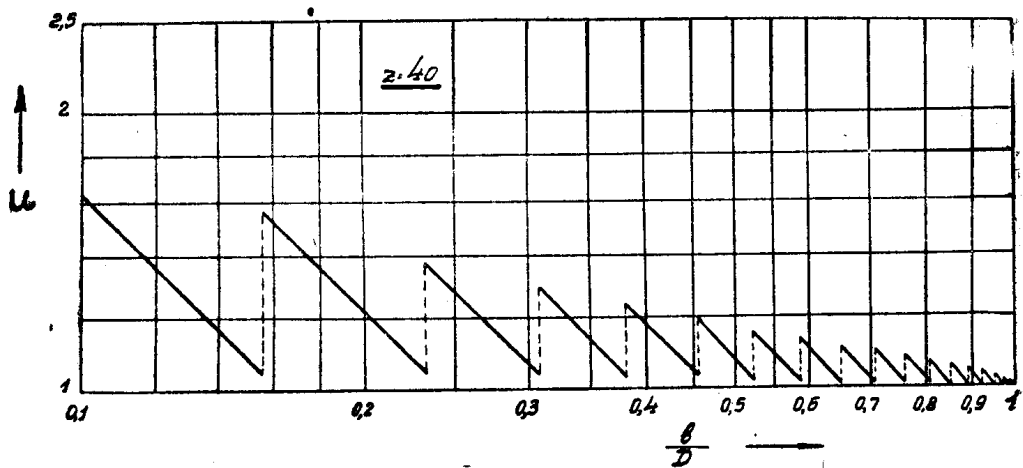


Рис. 17.

При рассмотрении рис. 4—17 возникает вопрос, чему же практически будет равен коэффициент μ при значениях $\frac{b}{D}$, связанных со скачкообразным изменением μ . Так при $\frac{b}{D} = 0,31$, мы по рис. 9 имеем два значения: нижнее — $\mu = 1,05$ и верхнее значение — $\mu = 2,01$.

При $\frac{b}{D} = 0,59$ по рис. 9 имеем значения μ : 1,45 и 1,03. Итак, при каждом отношении $\frac{b}{D}$, при котором происходит скачок μ , мы будем иметь два значения коэффициента неравномерности. Спрашивается, которое из этих двух значений μ мы будем иметь в действительности во время работы.

Для ответа на этот вопрос нужно обратиться к действительному процессу резания со всеми сопутствующими ему явлениями. На рис. 18 представлен случай $z = 10$, $\frac{b}{D} = 0,59$.

При анализе поставленного вопроса, не трудно прийти к выводу, что большее значение η мы будем иметь в том случае, если при $\frac{b}{D} = 0,59$ (рис. 18) давление стружки будет действовать одновременно на три зуба.

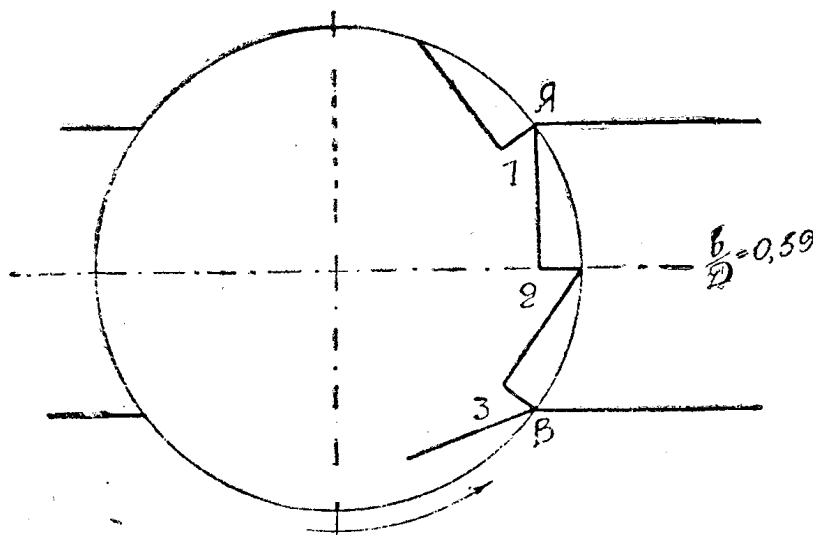


Рис. 18.

По рис. 18 будто бы так и получается, так как в тот момент, когда зуб 1 будет в точке А, зуб 3 уже будет находиться в точке В. В действительности же (и это подтверждает экспериментальная проверка) стружка, снимаемая зубом 1, отколется от обрабатываемого изделия несколько раньше, чем зуб достигнет точки А, т. е. зуб 1 потеряет свою нагрузку прежде, нежели зуб 3 достигнет точки В, войдет под стружку и будет нагружен ею, то-есть нагрузка одновременно может быть лишь на двух зубьях и практически мы будем иметь меньшее значение коэффициента неравномерности μ . И во всех случаях, когда отношение $\frac{b}{D}$ связано со скачком μ , практически мы будем иметь в работе меньшее из двух значений μ , а по-

тому отношения $\frac{b}{D}$, связанные со скачками μ , т. е. удовлетворяющие условию:

$$\frac{b}{D} = \sin \left(\frac{m}{2} \cdot \frac{360^\circ}{Z} \right)$$

будут наиболее благоприятными с точки зрения равномерности процесса резания.

Из анализа уравнения 4, а также из сравнения приводимых нами рисунков, можно сделать заключение, что увеличение числа зубцов фрезера ведет к снижению значений μ .

Из всего изложенного должно быть ясно, насколько важно знать величину коэффициента неравномерности μ при эксплуатации фрезерного станка, насколько необходимо представлять себе закономерности изменения μ при выборе или проектировании лобового фрезера для той или иной операции, когда некоторым, часто незначительным изменением отношения $\frac{b}{D}$ или Z можно достигнуть существенного эффекта. Поэтому необходимо иметь возможность просто найти величину μ .

Уравнение 4, хотя и дает возможность точно подсчитать μ , неудобно для пользования, так как каждый подсчет отнимает много времени. Значительно удобнее графики, представленные на рис. 4—17, но для каждого числа зубцов фрезера нужно было бы иметь свой график.

Вполне достаточную для практики точность можно получить из предлагаемого графика (см. рис. 19), на котором в координатах $\frac{b}{D}$ и Z нанесены линии $\mu = \text{const}$. Здесь для любого значения $\frac{b}{D}$ и Z можно просто определить величину μ с точностью до 0,1—0,2. Некоторые места графика кажутся на первый взгляд неясными, так, например, для $Z=3$ при $\frac{b}{D} = 0,85$ мы не имеем на графике значения μ . Но мы видим, что для $Z=3$ при $\frac{b}{D} = 0,78$ и при $\frac{b}{D} = 0,9$, $\mu = 1,3$.

Кроме того, линии $\mu = 1,5$, $\mu = 1,7$ и $\mu = 1,1$ не доходят до $Z=3$. Отсюда можно заключить, что для $Z=3$ при $\frac{b}{D} = 0,85$ будем иметь значение μ между 1,3 и 1,5. Также для $Z=6$ и $\frac{b}{D} = 0,9$ можно заключить, что μ будет иметь значение между 1,1 и 1,3.

По графику видно, что при малых числах зубцов значения μ могут быть очень велики, особенно при малых отношениях $\frac{b}{D}$. В области больших Z и $\frac{b}{D}$ наоборот мы имеем дело с коэффициентами неравномерности более или менее близкими к единице. При $Z \geq 20$ и $\frac{b}{D} \geq 0,75$ будем всегда иметь $\mu \leq 1,1$.

На рис. 20 приведен график оптимальных значений $\frac{b}{D}$, дающих при выбранном z минимальное значение μ , т. е. удовлетворяющих зависимости

$$\frac{b}{D} = \sin \left(\frac{m}{2} \cdot \frac{360^\circ}{z} \right).$$

По этому графику, проводя горизонталь через выбранное z , мы в пересечении этой горизонтали с кривыми, получим оптимальное значение

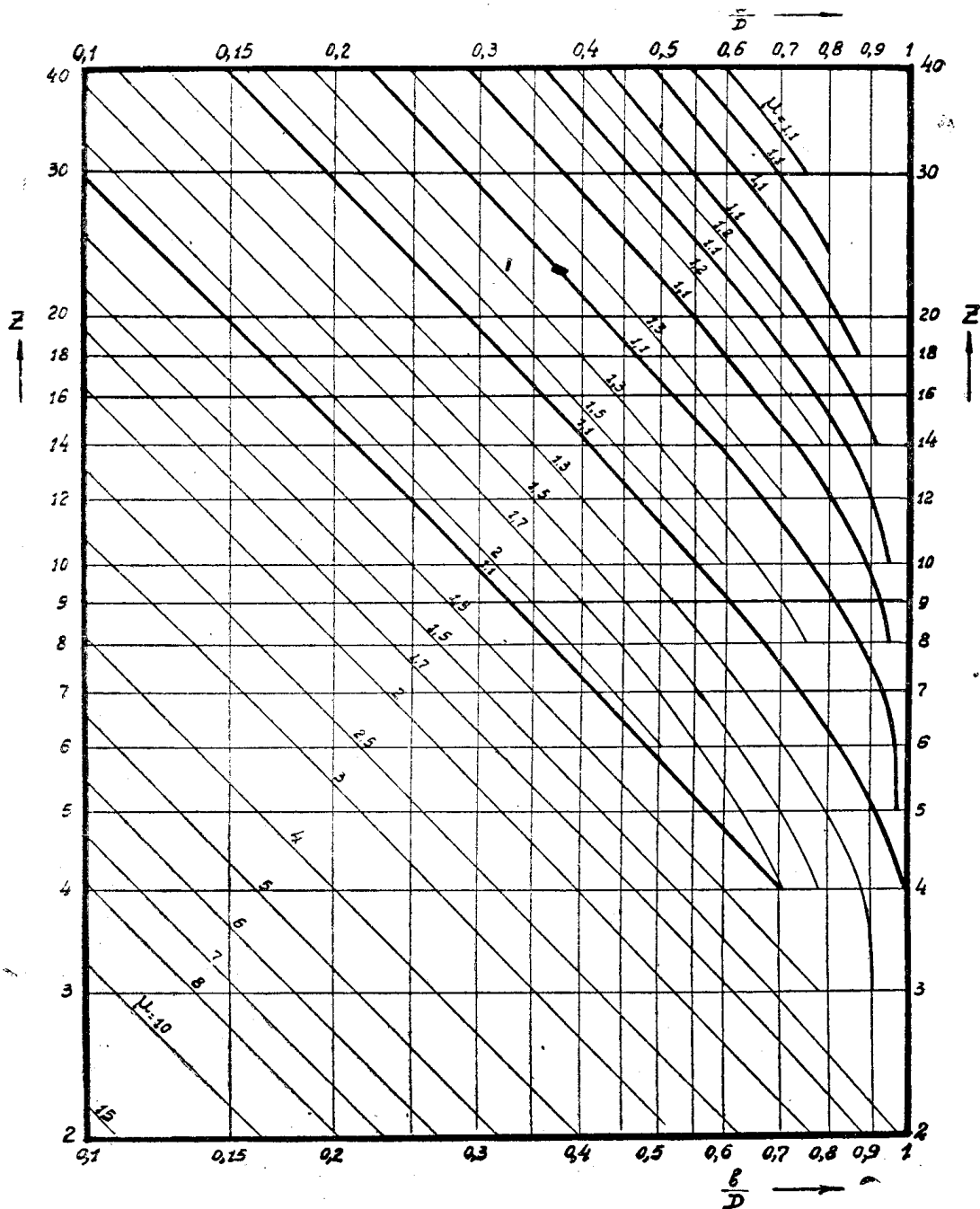


Рис. 19.

$\frac{b}{D}$. Не нужно думать, что при этом мы будем иметь $\mu = \text{const}$. Для $z = \text{const}$ коэффициент неравномерности будет тем меньше, чем больше отношение $\frac{b}{D}$. Так для $z = 10$ по рис. 20 мы имеем 5 оптимальных значений

$\frac{b}{D}$: 0,31; 0,588; 0,811; 0,95; 1,0. По рис. 9 значения μ при этом будут: 1,05; 1,03; 1,02; 1,01; 1,03.

Полное представление о связи между μ , z и $\frac{b}{D}$ дает рис. 21, на котором в пространственных координатах $z - \frac{b}{D} - \mu$ представлена зависимость коэффициента неравномерности μ от z и $\frac{b}{D}$.

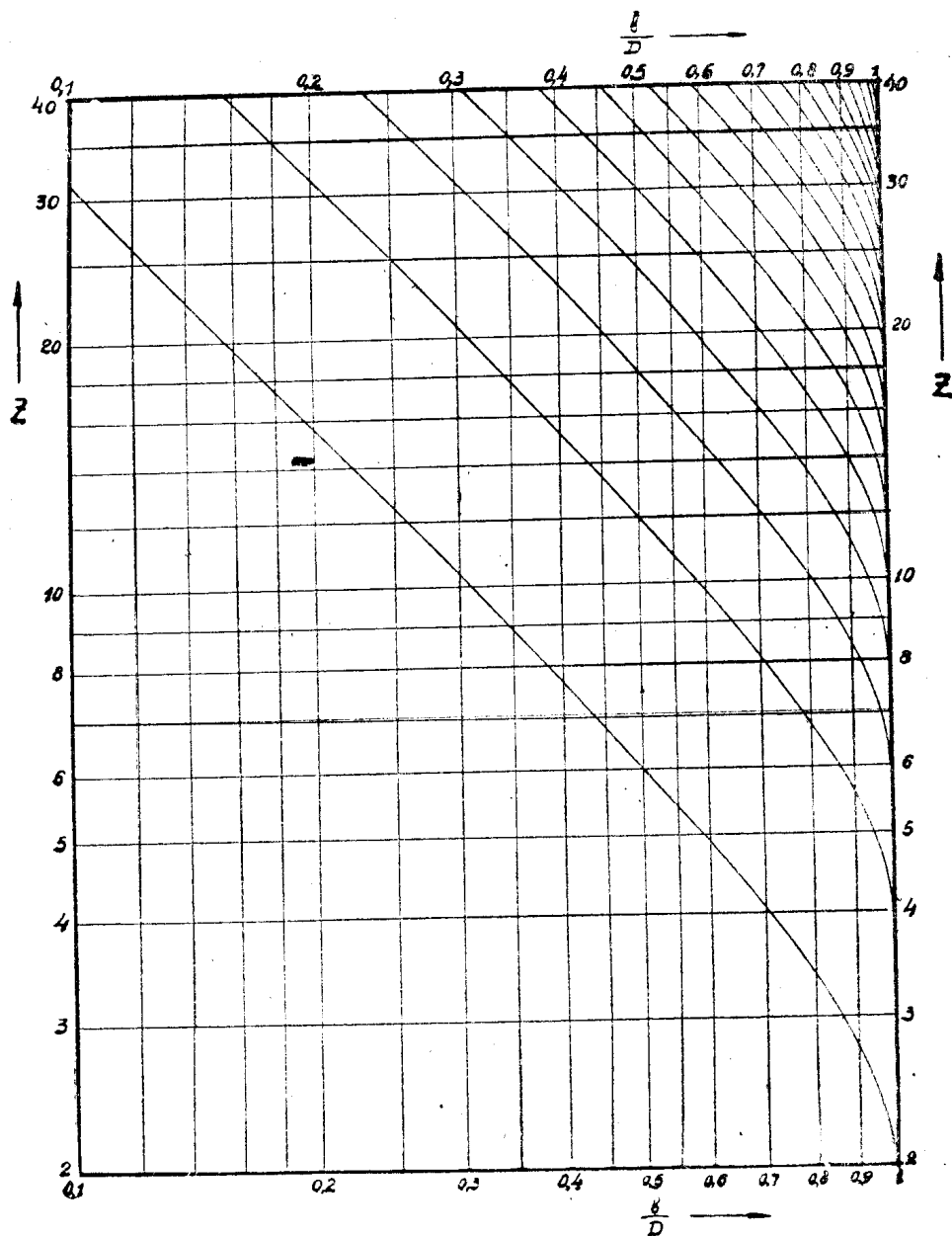


Рис. 20.

Для построения всех графиков мы провели все вычисления, взяв для величины k , входящей в показатели степеней уравнения 4, среднее значение $k = -0,25$.

Из нашей экспериментальной работы с лобовыми фрезерами следует, что при лобовом фрезеровании значение этой величины зависит от обрабатываемого материала и колеблется в пределах 0,2—0,315.

Таким образом, следовало бы для каждого обрабатываемого материала построить указанные графики по своему значению k . Ошибка в построении графиков по среднему значению ($k = -0,25$) практически совершенно незаметна, но это освобождает нас от необходимости построения графиков для различных обрабатываемых материалов.

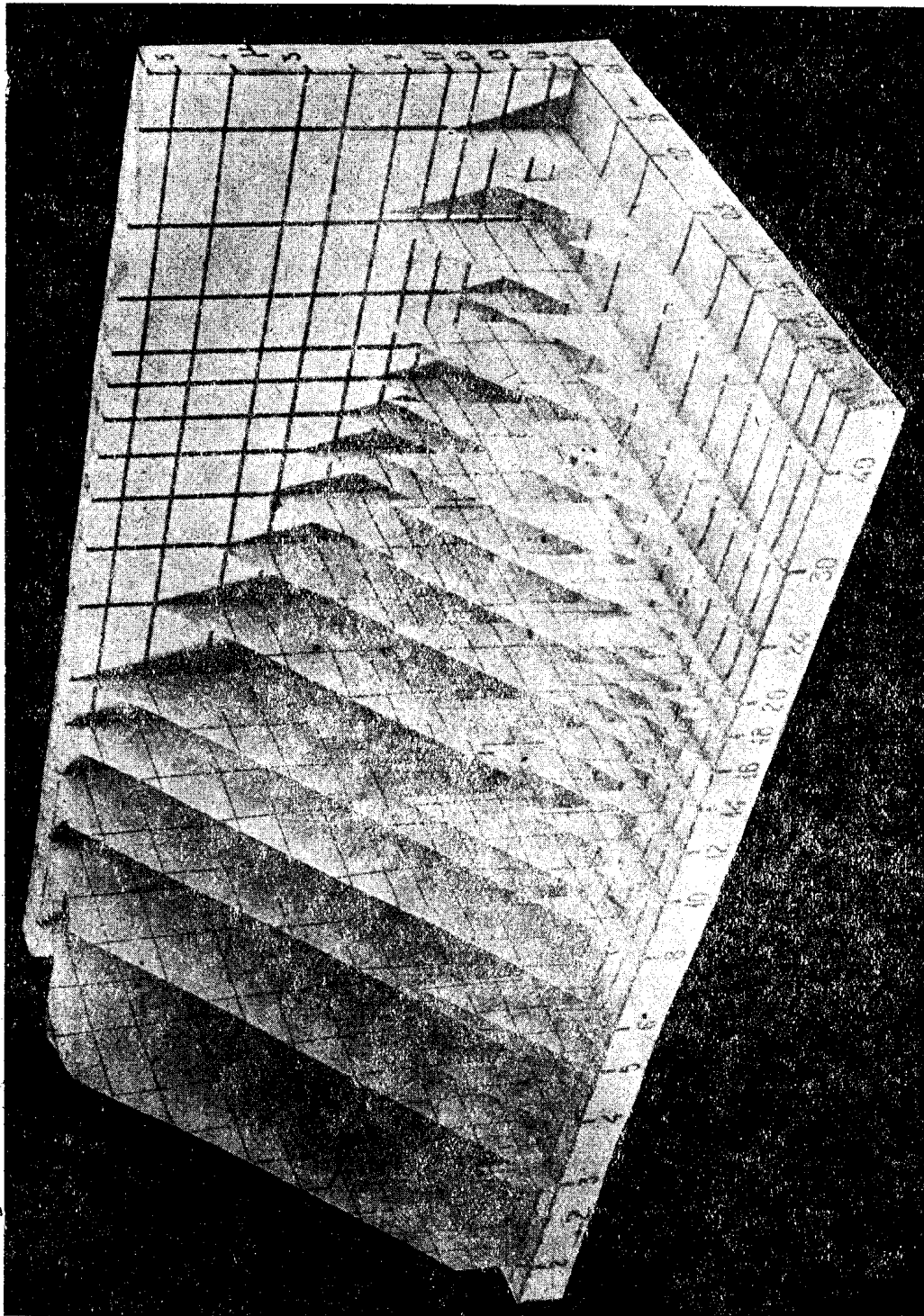


Рис. 21.

Мы совершенно не касались здесь вопроса неравномерности в случае бокового резания. Этот вопрос будет нами разобран одновременно с явлением неравномерности при работе цилиндрического фрезера, с чем он имеет много общего.

В заключение приводим пример, иллюстрирующий, какого эффекта можно достигнуть при учете коэффициента неравномерности при лобовом фрезеровании.

Пусть задано: Мощность на шпинделе 4 НР.
 Максимальный крутящий момент на шпинделе по прочности привода шпинделя $M_{max} = 90$ кгм.

Обработка чугуна $H_B = 150$.

$b = 120$ мм	Данные для подсчета мощности:
$t = 10$ "	
$D = 200$ "	
$z = 10$ "	
	$\lambda = 85$
	$k = -0,315$
	$l = -0,09$

$$\frac{b}{D} = \frac{120}{200} = 0,6$$

Для $z = 10$ и $\frac{b}{D} = 0,6$ $\mu = 1,41$.

Если возьмем $n = 32$ об/мин, чтобы осуществить скорость резания 20 м/мин, то при подаче $S = 110$ мм/мин — получим средний крутящий момент на шпинделе

$$M_{cp} = 63,5 \text{ кгм.}$$

При учете же коэффициента неравномерности будем иметь

$$M_{max} = \mu M_{cp} = 1,41 \cdot 63,5 = 90 \text{ кгм.}$$

Таким образом, при $n = 32$ об/мин и всех прочих принятых условиях, по прочности привода шпинделя, допускающего $M_{max} = 90$ кгм, подачу больше $S = 110$ мм/мин осуществить нельзя.

Если мы в этом же случае возьмем диаметр фрезера 218 мм и тем самым получим отношение

$$\frac{b}{D} = \frac{120}{218} = 0,55,$$

то коэффициент неравномерности для этого случая будет $\mu = 1,1$.

Применив при всех прочих постоянных условиях подачу $S = 164$ мм/мин, мы будем иметь средний крутящий момент

$$M_{cp} = 82 \text{ кгм.}$$

При учете же коэффициента неравномерности

$$M_{max} = \eta \cdot M_{cp} = 1,1 \cdot 82 = 90,2 \text{ кгм.}$$

Иначе говоря, простым изменением диаметра фрезера, при наличии на шпинделе станка того же максимального крутящего момента, мы повысим производительность на 49%, так как

$$\frac{164}{110} = 1,49.$$

Кроме того, во втором случае при более высокой производительности, условия работы станка будут более благоприятны, в силу большей стабильности нагрузки.

II. Неравномерность при работе цилиндрического фрезера.

При работе цилиндрического фрезера, независимо от угла подъема спирали зуба, средняя окружная сила может быть получена из уравнения мощности

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

$$P_{cp.} = \frac{2^{k+1}}{(k+2)} \frac{\lambda \cdot b}{\pi} S_z^{k+1} Z \cdot \sin^{k+2} \left(\frac{\varphi}{2} \right)$$

5

Здесь φ — угол контакта.

Для определения коэффициента неравномерности μ , необходимо иметь выражение для $(\Sigma P_{окр})_{max}$, которое будет различаться для фрезеров с прямым и со спиральным зубом.

Цилиндрический фрезер с прямым зубом.

Для фрезера с прямым зубом будем иметь

$$\begin{aligned} \Sigma P_{окр} &= \Sigma (b S_e K_s); \\ K_s &= \wedge S_e^k \\ S_e &= S_z \cdot \sin \psi \end{aligned}$$

где S_e — толщина стружки на зубе в данный момент,
 ψ — угол, определяющий мгновенное положение зуба,
 S_z — подача на один зуб

$$\begin{aligned} \Sigma P_{окр} &= \wedge \cdot b \cdot S_z^{k+1} \Sigma (\sin^{k+1} \psi) \\ \mu &= \frac{(\Sigma P_{окр})_{max}}{P_{ср.}} = \frac{K+2}{2^{k+1}} \cdot \frac{\pi (\Sigma \sin^{k+1} \psi)_{max}}{Z \cdot \sin^{k+2} \left(\frac{\varphi}{2} \right)} \end{aligned} \quad 6$$

Обозначая центральный угол между двумя зубьями через ε , будем иметь

$$\begin{aligned} (\Sigma \sin^{k+1} \psi)_{max} &= \sin^{k+1} \varphi + \sin^{k+1} (\varphi - \varepsilon) + \sin^{k+1} (\varphi - 2\varepsilon) + \\ &+ \sin^{k+1} \left\{ \varphi - (m-1)\varepsilon \right\}. \end{aligned}$$

Полагая кроме того $\frac{\varepsilon}{\varphi} = u$, получим

$$\begin{aligned} (\Sigma \sin^{k+1} \psi)_{max} &= \sin^{k+1} \varphi + \sin^{k+1} \left[\varphi (1-u) \right] + \sin^{k+1} \left[\varphi (1-2u) \right] + \\ &+ \sin^{k+1} \left[\varphi \left\{ 1 - (m-1)u \right\} \right] \end{aligned} \quad 7$$

В этом выражении m число зубьев, одновременно находящихся под стружкой.

Подставляя 7 в 6, а также заменяя

$$Z = \frac{2\pi}{\varepsilon} = \frac{2\pi}{u\varphi}$$

получим:

$$\begin{aligned} \mu &= \frac{K+2}{2^{k+2}} \cdot u\varphi \cdot \left\{ \frac{\sin^{k+1} \varphi + \sin^{k+1} \left[\varphi (1-u) \right] + \sin^{k+1} \left[\varphi (1-2u) \right]}{\sin^{k+2} \left(\frac{\varphi}{2} \right)} + \dots \right. \\ &\quad \left. \dots + \frac{\sin^{k+1} \left[\varphi \left\{ 1 - (m-1)u \right\} \right]}{\sin^{k+2} \left(\frac{\varphi}{2} \right)} \right\} \end{aligned} \quad 8$$

Из выражения 8 можно заключить, что коэффициент неравномерности μ зависит от $u = \frac{\varepsilon}{\varphi}$ и от φ .

На величину μ также оказывает влияние величина K , входящая в показатель степени у синуса и зависящая от обрабатываемого материала.

Руководствуясь нашей работой по цилиндрическим фрезерам, ¹⁾ можно принять для дальнейших расчетов, касающихся коэффициента неравномерности при работе цилиндрического фрезера для всех обрабатываемых материалов среднюю величину $k = -0,3$

Кроме того, нетрудно показать, что в основном μ зависит только от u , величина же угла контакта φ оказывает очень незначительное влияние.

Если мы зададимся крайними значениями $\varphi_{min} = 8^\circ$ и $\varphi_{max} = 60^\circ$, что будет соответствовать $\frac{t}{D} = 0,005$ и $\frac{t}{D} = 0,25$ (пределы, за которые в производстве никогда не выходят при работе цилиндрических фрезеров), то влияние угла φ на значение μ можно усмотреть из таблицы 1.

Таблица 1

$U = \frac{\varepsilon}{\varphi}$	μ		μ ср.
	при $\varphi = 8^\circ$	при $\varphi = 60^\circ$	
0,2	1,155	1,155	1,155
0,4	1,36	1,36	1,36
0,6	1,54	1,52	1,53
0,8	1,78	1,75	1,765
1	1,68	1,60	1,64
1,5	2,52	2,40	2,46
2	3,36	3,20	3,28
3	5,04	4,8	4,92
5	8,4	8,0	8,2

Таким образом влиянием φ на коэффициент неравномерности μ можно вполне пренебречь.

Итак, при прямозубом фрезере μ зависит лишь от $\frac{\varepsilon}{\varphi}$, т. е. от того, сколько зубцов одновременно находится под стружкой.

То обстоятельство, что мы пренебрегаем влиянием φ , а также для величины K берем среднее значение $K = -0,3$, вносит во все вычисления некоторые ошибки, которые однако практически несущественны, так как, как бы точно мы не определяли величину коэффициента неравномерности μ , мы все же никогда не можем учесть изменение неравномерности под влиянием всегда имеющегося в наличии биения фрезера. Поэтому мы считаем, что принятые нами допущения вполне приемлемы.

Цилиндрический фрезер со спиральным зубом.

При работе фрезера со спиральным зубом средняя окружная сила выражается тем же уравнением 5). Максимальная сумма окружных сил имеет следующую зависимость ⁴⁾

$$\left(\sum P_{окр.} \right)_{max} = D \cdot S_z^{K+1} \operatorname{tg} \beta \frac{2^{K+1}}{K+2} \sum \left[\sin^{K+2} \left(\frac{\psi_2}{2} \right) - \sin^{K+2} \left(\frac{\psi_1}{2} \right) \right]_{max} \quad 9$$

Здесь β — угол подъема спирали зуба.

ψ_1 и ψ_2 — углы, определяющие мгновенное положение каждого зуба.

Выражение для μ получим в следующем виде:

$$\mu = \frac{\left(\sum P_{окр.}\right)_{max}}{P_{ор}} = \frac{\pi D \operatorname{tg} \beta}{b z} \cdot \frac{\sum \left[\sin^{\kappa+2} \left(\frac{\psi_2}{2}\right) - \sin^{\kappa+2} \left(\frac{\psi_1}{2}\right) \right]_{max}}{\sin^{\kappa+2} \left(\frac{\varphi}{2}\right)};$$

$$\frac{\pi D \operatorname{tg} \beta}{z} = h$$

h — осевое расстояние между двумя зубьями.

$$\mu = \frac{h}{b} \frac{\sum \left[\sin^{\kappa+2} \left(\frac{\psi_2}{2}\right) - \sin^{\kappa+1} \left(\frac{\psi_1}{2}\right) \right]_{max}}{\sin^{\kappa+2} \left(\frac{\varphi}{2}\right)} \quad 10$$

Если представить положение зубьев фрезера на развернутой поверхности контакта, то $\sum \left[\sin^{\kappa+2} \left(\frac{\psi_2}{2}\right) - \sin^{\kappa+2} \left(\frac{\psi_1}{2}\right) \right]_{max}$ будет всегда соответствовать такому положению зубьев, когда один из них проходит через точку q , лежащую на линии выхода зубьев из под стружки pq . (Рис. 22)

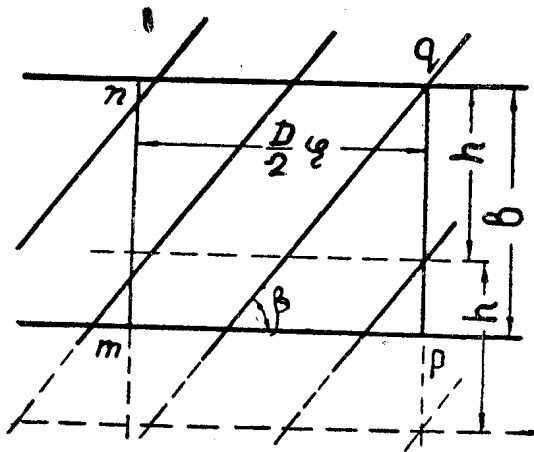


Рис. 22.

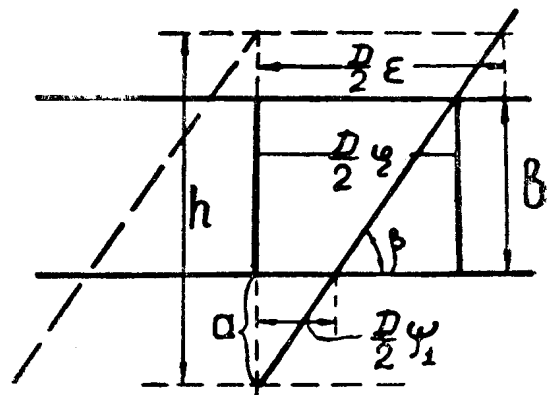


Рис. 23.

причем на этом зубе будет максимальное возможное поперечное сечение стружки, а на всех одновременно находящихся под стружкой максимальная суммарная сила. Это доказывается следующим образом*).

Если на ширине фрезерования b отделим ширину h , равную осевому расстоянию между двумя зубьями, то на ширине h будем иметь $\sum P = \operatorname{const}$.

На ширине $(b - h)$ изображенное положение зубьев соответствует $\left(\sum P\right)_{max}$, так как при дальнейшем их перемещении на ширине, дополняющей $(b - h)$ до h , будет возрастание сил.

Выясним, от каких факторов зависит величина μ при работе цилиндрического фрезера со спиральным зубом. Для этого рассмотрим несколько возможных соотношений $\frac{\epsilon}{\varphi} = u$ и $\frac{b}{h} = c$.

1 случай: $\epsilon > \varphi$; $b < h$ (рис. 23).

*) Настоящее доказательство, как и последующий за ним вывод предложен сотрудником автора Б. В. Суднишниковым, принимавшим участие в работе автора.

Для этого случая имеем
 $U > 1; C < 1;$

$$\frac{\psi_1}{\varepsilon} = \frac{a}{h}; \quad \frac{\varepsilon}{\varphi} = \frac{-h}{a+b}; \quad a = \frac{\varphi h - b\varepsilon}{\varepsilon};$$

$$\psi_1 = \frac{\varepsilon a}{h} = \varphi - \frac{b}{h} \cdot \varepsilon$$

Подставляя в последнее соотношение $\frac{b}{h} = C$ и $\varepsilon = u\varphi$, имеем

$$\psi_1 = \varphi(1 - cu)$$

Подставляя полученное в зависимость (10) для μ , получим:

$$\mu = \frac{1}{c} \frac{\sin^{\kappa+2} \left(\frac{\varphi}{2} \right) - \sin^{\kappa+2} \left[\frac{\varphi}{2} (1 - cu) \right]}{\sin^{\kappa+2} \left(\frac{\varphi}{2} \right)}$$

$$\mu = \frac{1}{c} \frac{1}{c} \cdot \frac{\sin^{\kappa+2} \left[\frac{\varphi}{2} (1 - cu) \right]}{\sin^{\kappa+2} \left(\frac{\varphi}{2} \right)}$$

11

II случай: $\varepsilon > \varphi; b > h$ (рис. 24).

Назовем число целых промежутков h , укладываемых в ширине b через p (для рис. 24 $p=2$).

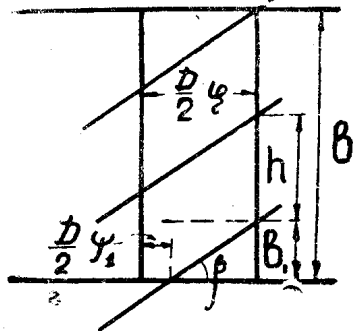


Рис. 24.

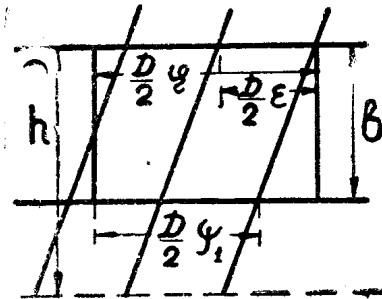


Рис. 25.

$$\frac{\varphi - \psi_1}{\varepsilon} = \frac{b_1}{h}; \quad \psi_1 = \varphi - \varepsilon \frac{b_1}{h}; \quad b_1 = b - ph;$$

$$\psi_1 = \varphi - \varepsilon \frac{b - ph}{h}$$

$$\psi_1 = \varphi - u\varphi(c - p)$$

$$\psi_1 = \varphi \left[1 - u(c - p) \right]$$

Выражение для $\left(\sum P_{\text{окр.}} \right)_{\text{max}}$ для этого случая примет вид:

$$\left(\sum P_{\text{окр.}} \right)_{\text{max}} = D \wedge S_z^{\kappa+1} \operatorname{tg} \beta \frac{2^{\kappa+1}}{k+2} \left\{ (p+1) \sin^{\kappa+2} \left(\frac{\varphi}{2} \right) - \right.$$

$$\left. - \sin^{\kappa+2} \left[\frac{\varphi}{2} \left\{ 1 - u(c - p) \right\} \right] \right\}$$

Выражение для коэффициента неравномерности получим

$$\mu = \frac{p+1}{c} - \frac{1}{c} \cdot \frac{\sin^{\kappa+2} \left[\frac{\varphi}{2} \left\{ 1 - u(c-p) \right\} \right]}{\sin^{\kappa+2} \left(\frac{\varphi}{2} \right)}$$

12

III случай: $\varepsilon < \varphi$; $b < h$ (рис. 25).

$$\frac{\varphi - \psi_1}{b} = \frac{\varepsilon}{h}; \quad \psi_1 = \varphi - \frac{b\varepsilon}{h}; \quad \psi_1 = \varphi(1 - cu)$$

Для этого случая будем иметь:

$$\begin{aligned} \left(\sum P_{окр} \right)_{max} &= D \lambda S_z^{\kappa+1} \operatorname{tng} \beta \frac{2^{\kappa+1}}{k+2} \left\{ \sin^{\kappa+2} \left(\frac{\varphi}{2} \right) + \right. \\ &+ \sin^{\kappa+2} \left[\frac{\varphi}{2} (1-u) \right] + \sin^{\kappa+2} \left[\frac{\varphi}{2} (1-2u) \right] + \sin^{\kappa+2} \left[\frac{\varphi}{2} (1-3u) \right] + \\ &+ u \text{ т. д. } - \sin^{\kappa+2} \left[\frac{\varphi}{2} (1-cu) \right] - \sin^{\kappa+2} \left[\frac{\varphi}{2} \left\{ 1 - u(c+1) \right\} \right] - \\ &- \sin^{\kappa+2} \left[\frac{\varphi}{2} \left\{ 1 - u(c+2) \right\} \right] - \sin^{\kappa+2} \left[\frac{\varphi}{2} \left\{ 1 - u(c+3) \right\} \right] - \text{и т. д.} \left. \right\} \\ \mu &= \frac{1}{c} + \frac{1}{c} \cdot \frac{\sin^{\kappa+2} \left[\frac{\varphi}{2} (1-u) \right] + \sin^{\kappa+2} \left[\frac{\varphi}{2} (1-2u) \right]}{\sin^{\kappa+2} \left(\frac{\varphi}{2} \right)} + \\ &+ \frac{1}{c} \cdot \frac{\sin^{\kappa+2} \left[\frac{\varphi}{2} (1-3u) \right] + \text{и т. д.}}{\sin^{\kappa+2} \left(\frac{\varphi}{2} \right)} - \frac{1}{c} \cdot \frac{\sin^{\kappa+2} \left[\frac{\varphi}{2} (1-cu) \right]}{\sin^{\kappa+2} \left(\frac{\varphi}{2} \right)} \\ &- \frac{1}{c} \frac{\sin^{\kappa+2} \left[\frac{\varphi}{2} \left\{ 1 - u(c+1) \right\} \right] + \sin^{\kappa+2} \left[\frac{\varphi}{2} \left\{ 1 - u(c+2) \right\} \right] + \text{и т. д.}}{\sin^{\kappa+2} \left(\frac{\varphi}{2} \right)} \dots 13 \end{aligned}$$

IV случай: $\varepsilon < \varphi$; $h < b$ (рис. 26)

Для этого случая

$$\frac{\varphi - \psi_1}{\varepsilon} = \frac{b - ph}{h}; \quad \psi_1 = \varphi \left[1 - u(c-p) \right]$$

$$\begin{aligned} \left(\sum P_{окр} \right)_{max} &= D \lambda S_z^{\kappa+1} \operatorname{tng} \beta \frac{2^{\kappa+1}}{k+2} \times \\ &\times \left\{ (p+1) \sin^{\kappa+2} \left(\frac{\varphi}{2} \right) + \sin^{\kappa+2} \left[\frac{\varphi}{2} (1-u) \right] + \right. \\ &+ \sin^{\kappa+2} \left[\frac{\varphi}{2} (1-2u) \right] + \text{и т. д.} \left. \right\} \end{aligned}$$

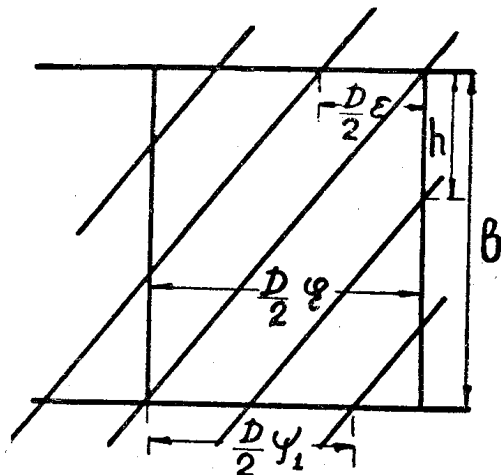


Рис. 26.

$$\begin{aligned}
& -\sin^{k+1} \left[\frac{\varphi}{2} \{1-u(c-p)\} \right] - \sin^{k+2} \left[\frac{\varphi}{2} \{1-u(c-p+1)\} \right] - \\
& - \sin^{k+2} \left[\frac{\varphi}{2} \{1-u(c-p+2)\} \right] - \text{и т. д.} \left. \right\}; \\
\mu = & \frac{p+1}{c} + \frac{1}{c \cdot \sin^{k+2} \left(\frac{\varphi}{2} \right)} \cdot \left\{ \sin^{k+2} \left[\frac{\varphi}{2} (1-u) \right] + \sin^{k+2} \left[\frac{\varphi}{2} (1-2u) \right] + \right. \\
& \left. + \sin^{k+2} \left[\frac{\varphi}{2} (1-3u) \right] + \text{и т. д.} \right\} - \\
& - \frac{1}{c \cdot \sin^{k+2} \left(\frac{\varphi}{2} \right)} \left\{ \sin^{k+2} \left[\frac{\varphi}{2} \{1-u(c-p)\} \right] + \right. \\
& \left. + \sin^{k+2} \left[\frac{\varphi}{2} \{1-u(c-p+1)\} \right] + \sin^{k+2} \left[\frac{\varphi}{2} \{1-u(c-p+2)\} \right] + \text{и т. д.} \right\} \dots 14
\end{aligned}$$

Нетрудно заметить, что уравнение 14 является общим видом уравнения неравномерности, частными случаями которого являются уравнения 11, 12 и 13.

По уравнению 14 можно сделать заключение, что величина μ зависит от $c = \frac{b}{h}$, $u = \frac{\varepsilon}{\varphi}$ и φ ; p является функцией c , самостоятельно изменяться независимо от c не может и самостоятельного влияния на μ иметь не может.

Влияние угла контакта φ отсутствует совершенно в тех случаях, когда $u \geq 1$ и $u(c-p) \geq 1$.

И во всех иных случаях влияние φ на μ очень незначительно, что можно видеть из табл. 2.

Таблица 2.

$u = \frac{\varepsilon}{\varphi}$	$c = \frac{b}{h}$	μ		$\mu_{\text{среднее}}$
		$\varphi = 8^\circ$	$\varphi = 60^\circ$	
0,2	0,1	1,14	1,11	1,125
0,2	0,5	1,11	1,07	1,09
0,2	1,5	1,036	1,023	1,03
0,5	0,1	1,34	1,25	1,29
0,5	0,5	1,195	1,176	1,185
0,5	1,5	1,068	1,059	1,063
1	0,1	1,62	1,49	1,55
1	0,5	1,405	1,35	1,37
1	1,5	1,23	1,11	1,17
3	0,1	4,6	4,3	4,45
3	0,5	2	2	2
3	1,5	1,33	1,33	1,33
10	0,1	10	—	—
10	0,5	2	—	—
10	1,5	1,33	—	—

В таблице 2 значения μ подсчитаны для ряда частных значений u и c , взятых в достаточно широких пределах. В пределах $\varphi = 8^\circ$, $\varphi = 60^\circ$ влияние φ столь невелико, что им можно пренебречь. Таким образом коэффициент неравномерности μ можно выразить в зависимости от $\frac{\varepsilon}{\varphi}$ и $\frac{b}{h}$.

Ввиду сложности полученных выражений для μ , мы поставили себе целью составить график, по которому для любых в производстве встречающихся значений $\frac{b}{h}$ и $\frac{\varepsilon}{\varphi}$ можно было просто найти значение коэффициента неравномерности μ . При всех вычислениях мы принимали $K = -0,3$, как среднее для обработки различных материалов цилиндрическим фрезером.

Кроме того значение μ вычислялось нами как среднее из значений для $\varphi = 8^\circ$ и $\varphi = 60^\circ$.

На рис. 27 представлен график изменения μ для нескольких частных значений $u = \frac{\varepsilon}{\varphi}$ в зависимости от $c = \frac{b}{h}$.

По графику видно, что μ снижается (равномерность увеличивается) с уменьшением $\frac{\varepsilon}{\varphi}$, т. е. или с увеличением числа зубцов фрезера при постоянном отношении $\frac{t}{D}$ или с увеличением $\frac{t}{D}$ при

постоянном Z . С изменением $\frac{b}{h}$ коэффициент неравномерности изменяется периодически, снижаясь до $\mu = 1$ при $\frac{b}{h}$

равном любому целому числу, в промежутках же между этими значениями, возрастая до более или менее высоких значений. Максимумы μ расположены не посередине между целыми значениями

$\frac{b}{h}$. Отсюда можно заключить, что максимум коэффициента неравномерности не совпадает с максимумом степени неравномерности, который, судя по работам Грановского и *Salomon'a*³⁾, расположен точно посередине между целыми значениями $\frac{b}{h}$.

На рис. 28 мы даем сводный график коэффициента неравномерности. Здесь в координатах $\frac{b}{h}$ и $\frac{\varepsilon}{\varphi}$ изображены кривые постоянных μ , с обозначением на каждой из них, какому значению μ она соответствует.

По этому графику для любого $\frac{b}{h}$ в пределах от 0,01 до 10 и для любого $\frac{\varepsilon}{\varphi}$ в пределах от 0,2 до 10 просто находится значение $\mu = \frac{(\sum P_{окр})_{max}}{P_{cp}} =$

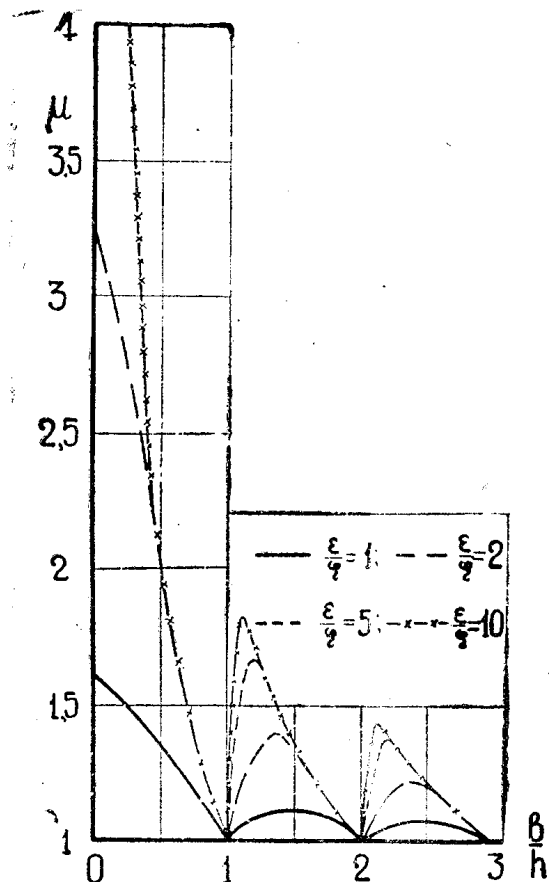


Рис. 27.

$= \frac{M_{max}}{M_{cp}}$. Таким образом, найдя из уравнения мощности P_{cp} или M_{cp} и определив по рис. 28 значение μ , легко получаем максимальную окружную силу на фрезере или максимальный крутящий момент для определенного режима резания.

Для того, чтобы облегчить подсчет значений $\frac{e}{\varphi} = f(D, t, Z)$ и $\frac{b}{h} = f(D, \beta, Z, b)$, на рис. 29 дан объединенный график.

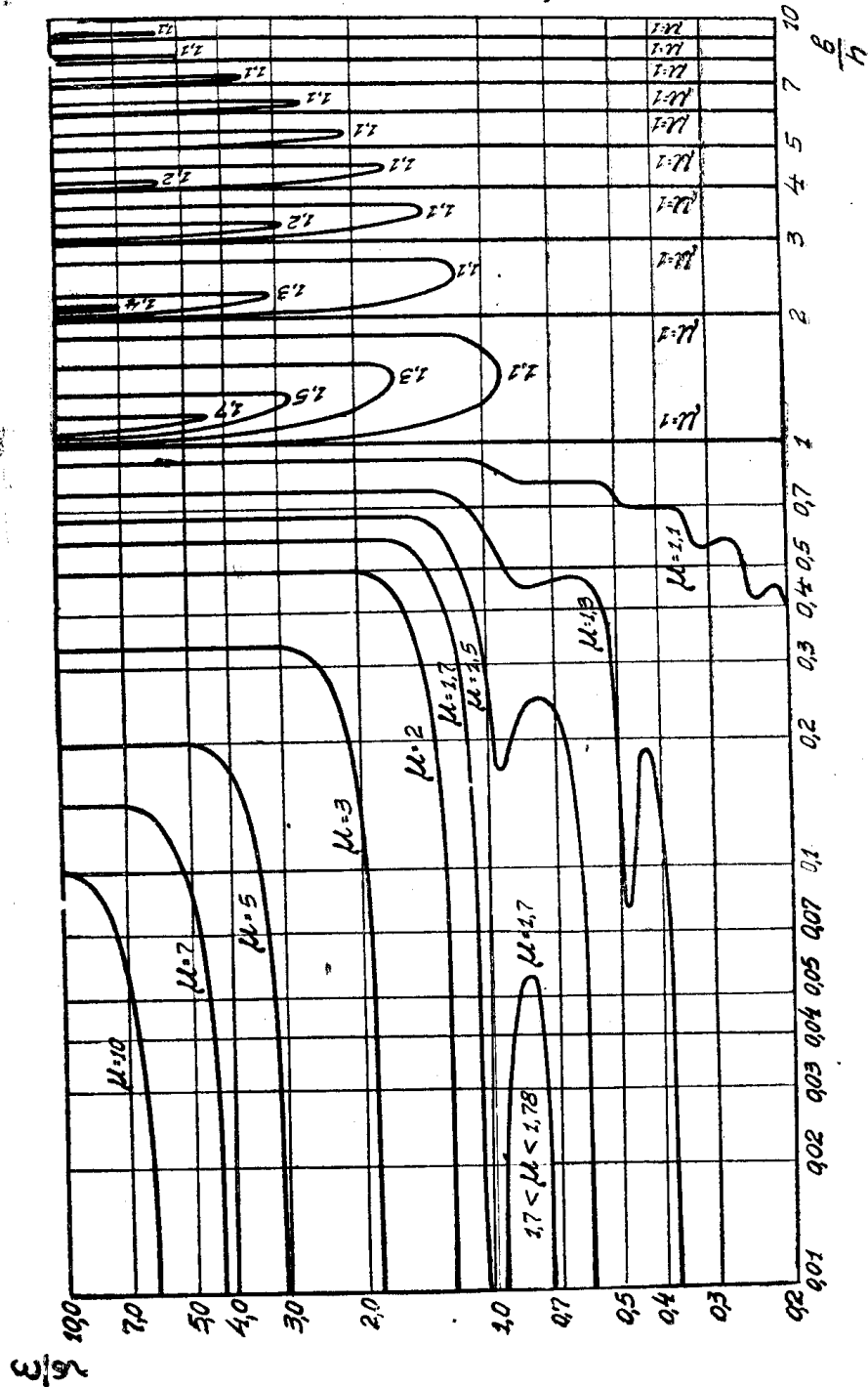


Рис. 28.

Как мы выяснили выше, для прямозубого фрезера μ зависит лишь от $\frac{e}{\varphi}$. На рис. 28 кривые постоянных μ при $\frac{b}{h} = 0,01$ дают для различ-

ных значений $\frac{e}{\varphi}$ величины коэффициентов μ для прямозубого фрезера, в чем не трудно убедиться, если сопоставить их с данными таблицы I.

По рис. 28 видно, что μ достигает высоких значений при $\frac{b}{h} < 1$ и $\frac{e}{\varphi} > 1$. Такие соотношения нередки в производстве, так как современные фрезера, особенно предназначенные для тяжелой работы, обычно имеют небольшое число зубцов.

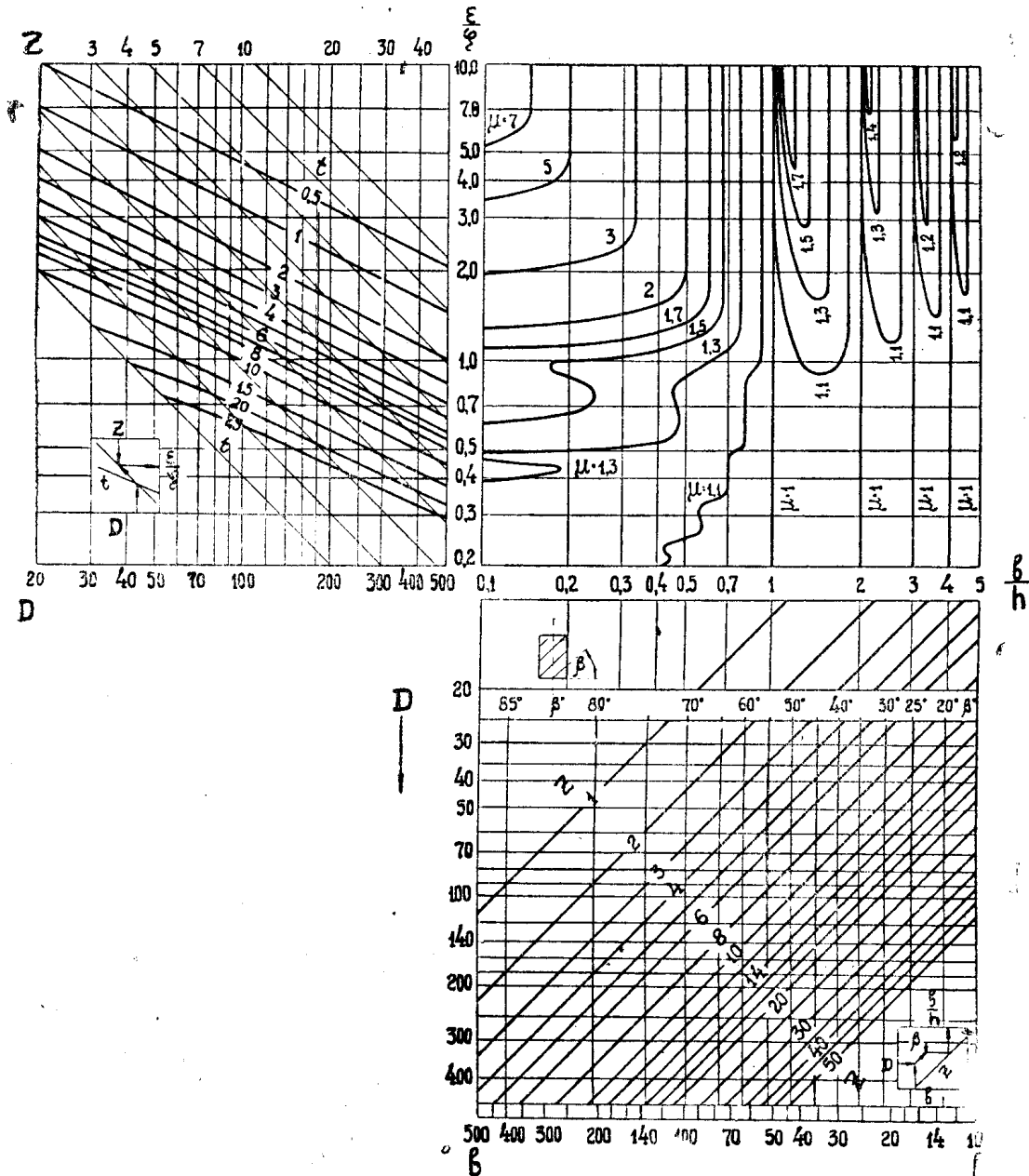


Рис. 29.

Из этих же графиков следует, что для достижения возможно большей равномерности следует снижать $\frac{e}{\varphi}$ и увеличивать $\frac{b}{h}$. Первое потребовало бы при заданной глубине фрезерования или увеличения числа зубцов или уменьшения диаметра фрезера.

Увеличение числа зубцов нежелательно и современные фрезера высокой производительности обычно имеют малое число зубцов ($Z = 6 - 12$):

уменьшение диаметра точно также не может быть значительным, так как желательно иметь диаметр фрезера, позволяющий посадить его на достаточно прочную оправку.

Поэтому для достижения возможно меньших значений μ необходимо стремиться к увеличению отношения $\frac{b}{h}$, это достигается применением фрезеров с крутой спиралью, которые при небольшом числе зубцов имеют незначительные осевые расстояния между зубцами (h). Современные фрезера высокой производительности обычно и имеют небольшое число зубцов с большим углом наклона спирали относительно оси фрезера.

Известно положение, что колебания нагрузки на фрезера будут совершенно отсутствовать в том случае, если ширина фрезерования b удовлетворяет равенству.

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

где C — любое целое число.

Этот случай является наиболее благоприятным как с точки зрения динамики процесса, так и с точки зрения стойкости фрезера и чистоты обрабатываемой поверхности. К указанному соотношению нужно всегда стремиться, подбирая соответствующий фрезер.

Во многих случаях практики можно достигнуть совершенного отсутствия колебаний силы и при $b = C \frac{H}{Z}$.

Для этого обрабатываемое изделие нужно таким образом расположить относительно фрезера, чтобы размер фрезеруемой поверхности, измеренный в направлении параллельности оси фрезера, равнялся $C \frac{H}{Z}$.

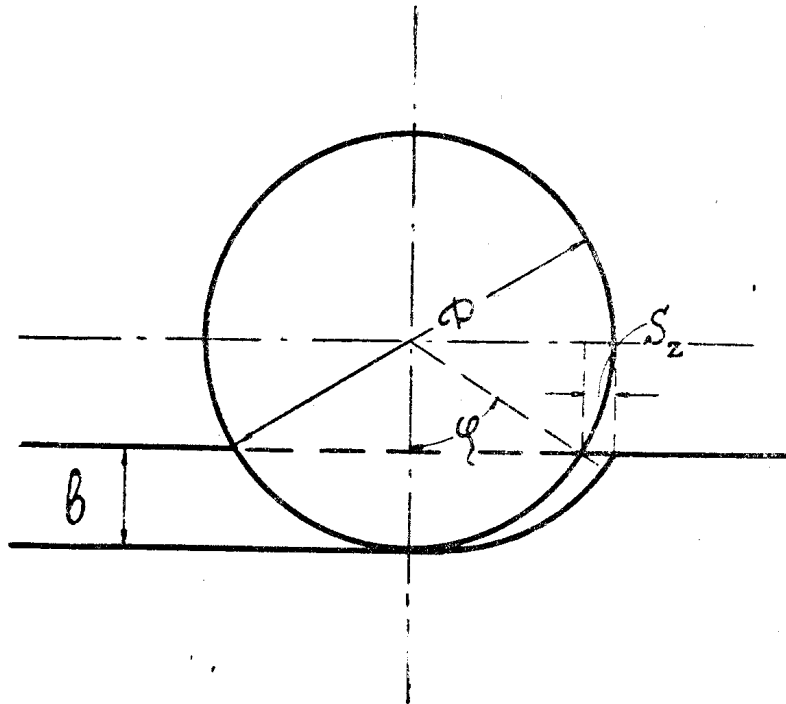


Рис. 30.

При работе на универсально-фрезерном станке этого можно достигнуть поворотом стола на угол ω причем: $\cos \omega = \frac{bz}{C\pi D \operatorname{tg} \beta}$

В первой части работы нами было указано, что вопрос неравномер-

ности в случае бокового фрезерования с $b \leq \frac{D}{2}$, когда каждый зуб торцевого фрезера забирает стружку с нулевой толщины (см. рис. 30), имеет много общего с работой цилиндрического фрезера. Коэффициент неравномерности μ для этого случая может быть получен по рис. 28 так же, как для прямозубого фрезера ($\beta = 90^\circ$).

Мы для вычисления величины μ при работе цилиндрического фрезера пользовались средним значением показателя степени $k = -0,3$, а при работе торцевых фрезеров следовало бы брать $k = -0,25$, но это отступление существенно не скажется на величине μ и исказит ее, как это показывают подсчеты, не более чем на 2—2,5%.

Заключение.

В результате проведенного исследования, нами даны графики коэффициента неравномерности, по которым можно просто определить отношение максимальной нагрузки на фрезере к ее среднему значению для данного режима. По этим же графикам не представляет затруднений найти наиболее благоприятные соотношения между шириной фрезеруемой поверхности и основными параметрами фрезера, удовлетворяющие условию наибольшей равномерности процесса резания и позволяющие без повышения силовой нагрузки на инструмент и детали станка достигнуть увеличения производительности.

Все приведенные выводы не предусматривают влияния биения фрезера на неравномерность, что будет несколько исказить явление, но тем меньше, чем правильнее заточен фрезер и чем толще снимается стружка каждым зубом фрезера.

Литература.

1. Розенберг. — Работа цилиндрического фрезера. Орга—Информация 1935 г. № 12.
2. Розенберг. — Динамика лобового фрезерования. Известия Томского индустриального института. 1937 год.
3. Грановский. — О равномерности фрезерования. Орга—Информация. 1935 года. № 6.
- Ларин. — Неравномерность работы цилиндрического фрезера. Орга—Информация 1935 г. № 9.
- Шродер. — Значение толщины стружки при фрезеровании. „Машиненбау“ 1934 г. № 19/20.
- Заломон. — Безинерционные измерения в процессе резания. „Леве-Нотицен“. 1929 год
- Кикебуш и Поль. — Силы и их колебания при фрезеровании цилиндрическими фрезами. „Машиненбау“ 1935 г. № 9/10.
- Розенберг и Суднишников — Теория работы цилиндрической фрезы со спиральным зубом. Вестник металлопромышленности. 1933 год. № 4.