

## ПОВЫШЕНИЕ ТОЧНОСТИ И ПРОИЗВОДИТЕЛЬНОСТИ МЕХАНИЧЕСКОЙ ОБРАБОТКИ

**Новиков Ф.В., докт. техн. наук, проф., Бережной Р.А.**

*(Харьковский национальный экономический университет,  
ОАО Харьковский машиностроительный завод “Свет шахтера”)*

Создание конкурентноспособной машиностроительной продукции и выход на мировые рынки требуют непрерывного совершенствования технологий изготовления деталей машин и в особенности их механической обработки с точки зрения повышения точности, качества и производительности обработки. В настоящее время накоплен большой практический опыт решения данных задач. Вместе с тем, существуют и неиспользованные резервы [1], что требует проведения более глубоких исследований, основанных, в первую очередь, на математическом моделировании физических закономерностей механической обработки. Цель работы – теоретическое определение условий повышения точности и производительности обработки на финишных операциях, в частности, на операциях шлифования.

В наших работах [2, 3] получено теоретическое решение о характере изменения во времени величины упругого перемещения  $y$ , возникающего в технологической системе при шлифовании (рис. 1), которое может быть использовано для анализа путей повышения точности и производительности обработки:

$$\frac{y}{y_{уст}} = 1 - e^{-\frac{P}{y_{уст}}}, \quad (1)$$

где  $P$  – величина снимаемого припуска при шлифовании прямолинейного образца, движущегося по нормали к рабочей поверхности круга с постоянной

скоростью  $V$ , м;  $y_{уст} = \frac{\sigma \cdot Q}{c \cdot K_{ш} \cdot V_{кр}}$ ;  $\sigma$  – условное напряжение резания при

шлифовании, Н/м<sup>2</sup>;  $c$  – приведенная жесткость технологической системы в радиальном направлении, Н/м;  $K_{ш} = P_z / P_y$  – коэффициент шлифования, равный отношению тангенциальной  $P_z$  и радиальной  $P_y$  составляющих силы резания;  $Q = F \cdot V$  – производительность обработки, м<sup>3</sup>/с;  $F$  – площадь поперечного сечения обрабатываемого образца, м<sup>2</sup>;  $V_{кр}$  – скорость круга, м/с.

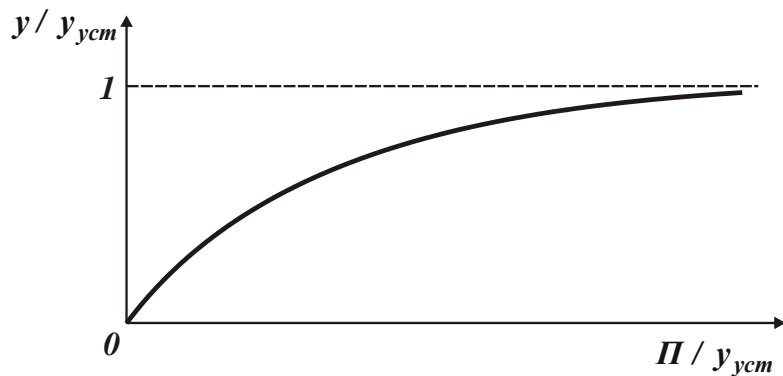


Рис. 1. Зависимость  $y/y_{уст}$  от  $\Pi/y_{уст}$ .

Как следует из зависимости (1), а также из рис. 1 и табл. 1, между соотношениями  $\Pi/y_{уст}$  и  $y/y_{уст}$  существует вполне однозначная связь: чем больше  $\Pi/y_{уст}$ , тем больше соотношение  $y/y_{уст}$ , которое

асимптотически приближается к единице. Добиться требуемого значения  $y$  при заданном значении  $\Pi$  можно выбором соответствующего значения  $y_{уст}$ . Однако это, как правило, связано с уменьшением производительности обработки. Чтобы решить задачу обеспечения заданной точности обработки, определяемой величиной  $y$ , без уменьшения производительности обработки, прибегают к выполнению операций в несколько переходов за счет дискретного (или непрерывного) уменьшения во времени скорости радиальной подачи  $V$ . Поэтому, используя зависимость (1), важно оценить эффективность данного подхода, т.е. оценить возможности повышения производительности обработки с учетом ограничения по точности размера обрабатываемой поверхности, определяемой величиной  $y$ .

Таблица 1

Расчетные значения  $y/y_{уст}$  и  $\varepsilon = \Pi/y$

$\frac{\Pi}{y_{уст}}$	$\frac{y}{y_{уст}}$	$\varepsilon = \frac{\Pi}{y}$		$\frac{\Pi}{y_{уст}}$	$\frac{y}{y_{уст}}$	$\varepsilon = \frac{\Pi}{y}$
0	0	–		1,6	0,798	2,005
0,1	0,095	1,052		1,7	0,817	2,080
0,2	0,181	1,104		1,8	0,834	2,158
0,3	0,259	1,158		1,9	0,85	2,235
0,4	0,329	1,215		2,0	0,865	2,312
0,5	0,393	1,272		2,1	0,878	2,391
0,6	0,451	1,330		2,2	0,89	2,471
0,7	0,503	1,391		2,3	0,9	2,555
0,8	0,55	1,454		2,4	0,91	2,637
0,9	0,593	1,517		2,5	0,918	2,723
1,0	0,632	1,582		2,6	0,926	2,807
1,1	0,667	1,649		2,7	0,933	2,893
1,2	0,698	1,719		2,8	0,94	2,978
1,3	0,728	1,785		2,9	0,945	3,068
1,4	0,753	1,859		3,0	0,95	3,157
1,5	0,777	1,93		3,1	0,955	3,246

Для этого рассмотрим операцию шлифования, выполняемую за два перехода с обеспечением на втором переходе погрешности обработки, равной заданной величине  $y_2$ . Определим основное время обработки для трех случаев. Предположим, что в первом случае выполняется условие  $\Pi / y_{ycm1} = y_1 / y_{ycm2}$ . Тогда, исходя из зависимости (1), справедливо условие  $y_1 / y_{ycm1} = y_2 / y_{ycm2}$  и соответственно условия  $\Pi / y_1 = y_1 / y_2 = y_{ycm1} / y_{ycm2}$ , т.е. уточнения на двух переходах  $\varepsilon_1 = \Pi / y_1$  и  $\varepsilon_2 = y_1 / y_2$  равны между собой (здесь величины с индексом 1 относятся к первому переходу, а с индексом 2 – ко второму переходу). Во втором и третьем случаях уточнения на двух переходах различны. Во всех трех случаях принимаем  $\Pi = 1$  мм.

Случай 1. Пусть  $\Pi / y_{ycm1} = 2$ . Тогда, исходя из табл. 1, полученной на основе зависимости (1), отношение  $y_1 / y_{ycm1} = 0,865$ . Следовательно, величина  $y_{ycm1} = 0,5$  мм и уточнение  $\varepsilon_1 = \Pi / y_1 = 2,312$ . Соответственно, величина упругого перемещения  $y_1 = 0,432$  мм. Из условия  $\varepsilon_2 = y_1 / y_2 = 2,312$ , имеем  $y_2 = 0,186$  мм. Все расчетные данные сведены в табл. 2.

Таблица 2

Расчетные значения параметров

№ п/п	$\frac{\Pi}{y_{ycm1}}$	$\frac{y_1}{y_{ycm1}}$	$\varepsilon_1$	$y_1$ , мм	$y_{ycm1}$ , мм	$y_2$ , мм	$\varepsilon_2$	$\frac{y_1}{y_{ycm2}}$	$\frac{y_2}{y_{ycm2}}$	$y_{ycm2}$ , мм
1	2	0,865	2,312	0,432	0,5	0,186	2,312	2	0,865	0,216
2	1,4	0,753	1,862	0,537	0,714	0,186	2,887	2,7	0,939	0,198
3	3	0,95	3,157	0,316	0,333	0,186	1,698	1,15	0,678	0,274

Основное время обработки  $\tau$  на операции определяется зависимостью:

$$\tau = \frac{\Pi}{V_1} + \frac{y_1}{V_2} = B \cdot \left( \frac{\Pi}{y_{ycm1}} + \frac{y_1}{y_{ycm2}} \right), \quad (2)$$

где  $V_1, V_2$  – скорости радиальной подачи обрабатываемого образца на первом и

втором переходах, м/с;  $B = \frac{\sigma \cdot F}{c \cdot K_{ш} \cdot V_{кр}}$  – постоянная времени образования

упругого перемещения в технологической системе, с [4].

Как следует из табл. 2, в данном случае оба слагаемых, входящих в зависимость (2), равны между собой и  $\tau = 4B$ .

Случай 2. Примем  $\Pi / y_{ycm1} = 1,4$ . Тогда, исходя из табл. 1, отношение  $y_1 / y_{ycm1} = 0,753$ . Соответственно, величина  $y_{ycm1} = 0,714$  мм, уточнение  $\varepsilon_1 = \Pi / y_1 = 1,862$  и  $y_1 = 0,537$  мм. Принимая величину  $y_2$  такой же как и в первом случае, т.е.  $y_2 = 0,186$  мм, уточнение на втором переходе  $\varepsilon_2 = y_1 / y_2 = 2,897$ . Из табл. 2 следует, что данное уточнение  $\varepsilon_2 = y_1 / y_2 = 2,887$  достигается

при  $y_1 / y_{ycm2} = 2,7$ . Соответственно,  $y_{ycm2} = 0,198$  мм. Подставляя в зависимость (2) значения  $\Pi / y_{ycm1} = 1,4$  и  $y_1 / y_{ycm2} = 2,7$ , имеем  $\tau = 4,1 \cdot B$ .

Случай 3. Примем  $\Pi / y_{ycm1} = 3$ . Согласно табл. 1, отношение  $y_1 / y_{ycm1}$

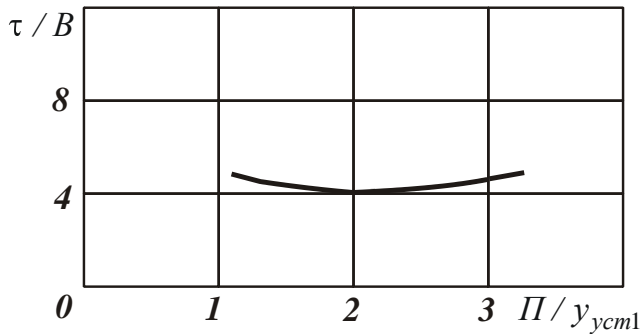


Рис. 2. Зависимость  $\tau / B$  от  $\Pi / y_{ycm1}$ .

$= 0,95$ . Тогда, уточнение  $\varepsilon_1 = \Pi / y_1 = 3,157$ ;  $y_{ycm1} = 0,333$  мм и  $y_1 = 0,316$  мм. Для заданного значения  $y_2 = 0,186$  мм, уточнение на втором переходе  $\varepsilon_2 = y_1 / y_2 = 1,698$ . Исходя из табл. 2 оно достигается при  $y_1 / y_{ycm2} = 1,15$ . Тогда,  $y_{ycm2} = 0,274$  мм. Подставляя в зависимость (2) значения  $\Pi / y_{ycm1} = 3$  и  $y_1 / y_{ycm2} = 1,15$ , имеем  $\tau = 4,15 \cdot B$ .

Сравнивая основное время обработки  $\tau$  для трех рассматриваемых случаев, видно, что требуемая точность обработки в первом случае достигается за наименьшее время  $\tau / B = 4$ , рис. 2. Следовательно, оптимальным вариантом обработки является первый случай, когда уточнения на каждом переходе равны, а длительность каждого перехода одинакова. Необходимо отметить, что во всех трех случаях суммарное уточнение  $\varepsilon_{сум} = \varepsilon_1 \cdot \varepsilon_2 = 5,376$ . При этом в первом случае  $\varepsilon_1 = \varepsilon_2$  (табл. 2), во втором случае  $\varepsilon_1 < \varepsilon_2$ , в третьем случае  $\varepsilon_1 > \varepsilon_2$ .

К данному решению можно прийти, рассматривая не частные три случая, а лишь один общий случай. Для этого представим основное время обработки  $\tau$  как функцию от одной переменной  $y_{ycm2}$ .

Разрешим зависимость (2) относительно величины  $y_{ycm1}$ :

$$y_{ycm1} = \frac{\Pi}{\left(\frac{\tau}{B} + \frac{y_1}{y_{ycm2}}\right)}. \quad (3)$$

Подставим полученную зависимость (3) в (1), рассматривая в ней  $y = y_1$ :

$$y_1 = \frac{\Pi}{\left(\frac{\tau}{B} + \frac{y_1}{y_{ycm2}}\right)} \cdot \left[1 - e^{-\left(\frac{\tau}{B} + \frac{y_1}{y_{ycm2}}\right)}\right]. \quad (4)$$

Представим величину  $y_2$  зависимостью, соответствующей зависимости (1):

$$\frac{y_2}{y_{ycm2}} = 1 - e^{-\frac{y_1}{y_{ycm2}}}. \quad (5)$$

Прологарифмируем зависимость (5) и разрешим ее относительно  $y_1$ :

$$y_1 = -y_{ycm2} \cdot \ln \left( 1 - \frac{y_2}{y_{ycm2}} \right). \quad (6)$$

Подставляя зависимость (6) в (4), имеем

$$-y_{ycm2} \cdot \ln \left( 1 - \frac{y_2}{y_{ycm2}} \right) = \frac{\Pi}{\left( \frac{\tau}{B} + \ln \left( 1 - \frac{y_2}{y_{ycm2}} \right) \right)} \cdot \left[ 1 - e^{-\left( \frac{\tau}{B} + \ln \left( 1 - \frac{y_2}{y_{ycm2}} \right) \right)} \right]. \quad (7)$$

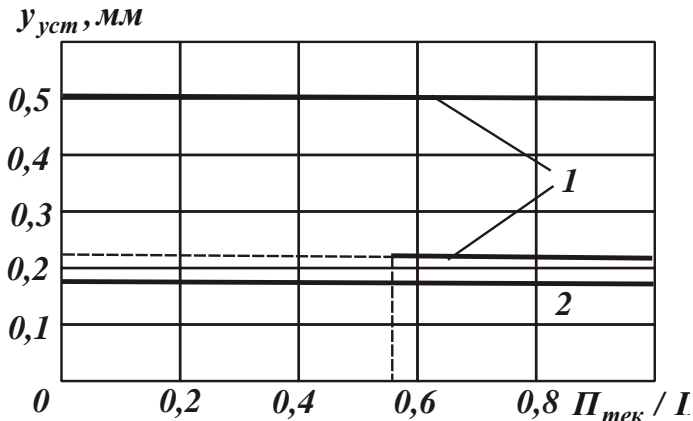


Рис. 3. Характер изменения  $y_{ycm}$  от текущего значения припуска  $\Pi_{mek} / \Pi$  при шлифовании в два (1) и один (2)

В итоге пришли к уравнению, в котором неизвестными являются две величины:  $\tau$  и  $y_{ycm2}$ . Параметры  $\Pi$ ,  $B$  и  $y_2$  являются заданными. Следовательно, для конкретных значений  $y_{ycm2}$  можно рассчитать основное время обработки  $\tau$ . Принимая в расчетах  $\Pi = 1$  мм и  $y_2 = 186$  мм для значений  $y_{ycm2} = 0,198$  мм; 0,216 мм и 0,274 мм (табл. 2), получено  $\tau/B = 4,1$ ; 4,0 и 4,15. Как видно, приходим к решению,

полученному выше для трех частных случаев, рис. 2. Из этого вытекает, что минимум функции  $\tau/B$  достигается при условии  $\Pi / y_{ycm1} = y_1 / y_{ycm2}$  и равенстве уточнений на двух переходах  $\varepsilon_1 = \Pi / y_1$  и  $\varepsilon_2 = y_1 / y_2$ .

Сравним основное время обработки  $\tau$  при шлифовании в два перехода и при шлифовании в один переход. В последнем случае уточнение равно  $\varepsilon = \Pi / y_2 = 1$  мм / 0,186 мм = 5,376. Исходя из табл. 1, данное уточнение выполняется при условии  $y_{ycm} \approx y_2 = 0,186$  мм. Тогда основное время обработки  $\tau = B \cdot \Pi / y_{ycm} \approx B \cdot \Pi / y_2 = 5,376 \cdot B$ . При шлифовании в два перехода (случай 1) основное время обработки  $\tau = 4B$ . Следовательно, выполнение шлифовании в два перехода позволяет сократить основное время обработки  $\tau$  на 25,5%. При этом скорости радиальной подачи на двух переходах, которые пропорциональны величине  $y_{ycm}$  (табл. 2), превышают скорость радиальной подачи (т.е. величину  $y_{ycm} \approx y_2 = 0,186$  мм) при шлифовании в один переход, рис. 3.

Определим оптимальные параметры обработки при шлифовании в три перехода, используя решения, полученные для рассмотренного выше случая 1:

$$\varepsilon = \frac{\Pi}{y_1} = \frac{y_1}{y_2} = \frac{y_2}{y_3} = \frac{y_{ycm1}}{y_{ycm2}} = \frac{y_{ycm2}}{y_{ycm3}}.$$

Соответственно суммарное уточнение равно:  $\varepsilon_{\text{сум}} = \Pi / y_3 = \varepsilon^3$ . Откуда  $\varepsilon = \sqrt[3]{\Pi / y_3} = \sqrt[3]{1\text{мм} / 0,186\text{мм}} = 1,75$ . Тогда  $y_1 = \Pi / \varepsilon = 0,571$  мм;  $y_2 = y_1 / \varepsilon = 0,326$  мм. Исходя из табл. 1, для  $\varepsilon = 1,75$ , имеем

$$y_{\text{уст}1} = \frac{\Pi}{1,25} = 0,8 \text{ мм}; \quad y_{\text{уст}2} = \frac{y_{\text{уст}1}}{\varepsilon} = 0,457 \text{ мм}; \quad y_{\text{уст}3} = \frac{y_{\text{уст}2}}{\varepsilon} = 0,261 \text{ мм}.$$

Характер изменения величины  $y_{\text{уст}}$  от текущего значения припуска  $\Pi_{\text{тек}} / \Pi$  по переходам показан на рис. 4.

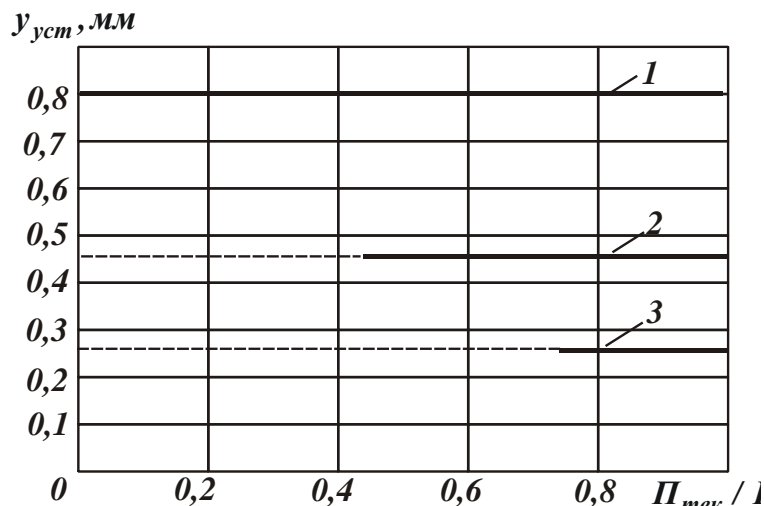


Рис. 4. Характер изменения величины  $y_{\text{уст}}$  от  $\Pi_{\text{тек}} / \Pi$  на трех переходах.

Основное время обработки  $\tau$  при шлифовании в три перехода равно

$$\tau = B \cdot \left( \frac{\Pi}{y_{\text{уст}1}} + \frac{y_1}{y_{\text{уст}2}} + \frac{y_2}{y_{\text{уст}3}} \right) =$$

$$= 3 \cdot B \cdot \frac{\Pi}{y_{\text{уст}1}} = 3 \cdot \frac{B}{0,8} = 3,75 \cdot B$$

Как видно, по сравнению с шлифованием в один переход ( $\tau = 5,376 \cdot B$ ) при шлифовании в три перехода основное время обработки  $\tau$  уменьшилось на

30%.

Аналогичным образом можно определить оптимальные параметры обработки при шлифовании в четыре перехода:

$$\varepsilon = \frac{\Pi}{y_1} = \frac{y_1}{y_2} = \frac{y_2}{y_3} = \frac{y_3}{y_4} = \frac{y_{\text{уст}1}}{y_{\text{уст}2}} = \frac{y_{\text{уст}2}}{y_{\text{уст}3}} = \frac{y_{\text{уст}3}}{y_{\text{уст}4}}.$$

Откуда суммарное уточнение равно:  $\varepsilon_{\text{сум}} = \Pi / y_4 = \varepsilon^4$ , соответственно  $\varepsilon = \sqrt[4]{\Pi / y_4} = \sqrt[4]{1\text{мм} / 0,186\text{мм}} = 1,52$ ;  $y_1 = \Pi / \varepsilon = 0,657$  мм;  $y_2 = y_1 / \varepsilon = 0,432$  мм;  $y_3 = y_2 / \varepsilon = 0,284$  мм. Исходя из табл. 1, для  $\varepsilon = 1,52$ , имеем

$$y_{\text{уст}1} = \frac{\Pi}{0,9} = 1,111 \text{ мм}; \quad y_{\text{уст}2} = \frac{y_{\text{уст}1}}{\varepsilon} = 0,73 \text{ мм}; \quad y_{\text{уст}3} = \frac{y_{\text{уст}2}}{\varepsilon} = 0,48 \text{ мм};$$

$$y_{\text{уст}4} = \frac{y_{\text{уст}3}}{\varepsilon} = 0,315 \text{ мм}.$$

Характер изменения величины  $y_{\text{уст}}$  от текущего значения припуска  $\Pi_{\text{тек}} / \Pi$  по переходам показан на рис. 5.

Основное время обработки  $\tau$  при шлифовании в четыре перехода равно

$$\tau = B \cdot \left( \frac{\Pi}{y_{ycm1}} + \frac{y_1}{y_{ycm2}} + \frac{y_2}{y_{ycm3}} + \frac{y_3}{y_{ycm4}} \right) = 4 \cdot B \cdot \frac{\Pi}{y_{ycm1}} = 4 \cdot \frac{B}{1,111} = 3,6 \cdot B.$$

По сравнению с шлифованием в один переход ( $\tau = 5,376 \cdot B$ ) при шлифовании в четыре перехода основное время обработки  $\tau$  уменьшилось на 33%.

Полученное решение можно распространить на операцию шлифования с большим количеством переходов  $n$ . В этом случае основное время обработки  $\tau$ , описываемое зависимостью (2), выразится

$$\tau = n \cdot B \cdot \Pi / y_{ycm1}. \quad (8)$$

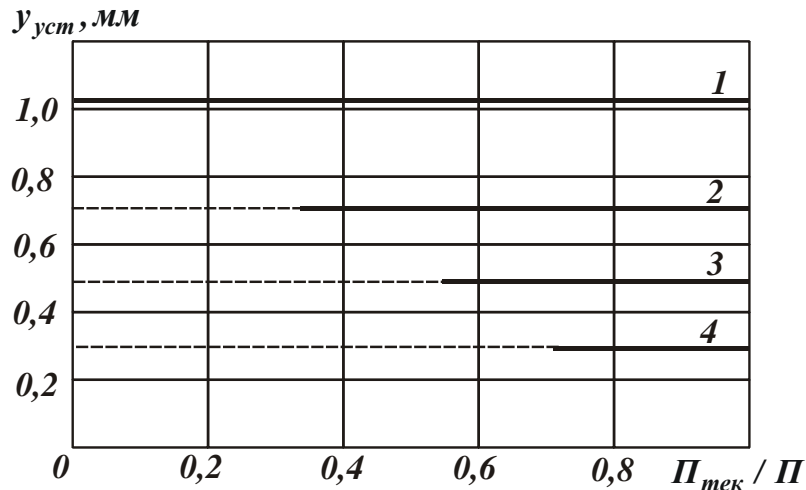


Рис. 5. Характер изменения величины  $y_{ycm}$  от  $\Pi_{мек} / \Pi$  на четырех переходах.

Учитывая экстремальный характер зависимости основного времени обработки  $\tau$  от величины  $y_1$  (или  $y_{ycm1}$ ), представляет интерес определение наименьшего значения  $\tau$  в зависимости от  $n$ . Для этого в зависимости (2) выразим  $n$  через уточнение  $\varepsilon$ , которое одинаково для всех переходов:

$$\frac{\Pi}{y_n} = \varepsilon_{сум} = \varepsilon^n, \quad (9)$$

где  $y_n$  – заданная погрешность обработки (величина упругого перемещения на  $n$ -ном переходе);  $\varepsilon_{сум}$  – суммарное уточнение на операции.

Логарифмируя выражение (9), имеем

$$n = \frac{\ln \varepsilon_{сум}}{\ln \varepsilon}. \quad (10)$$

В свою очередь, уточнение на переходе равно

$$\varepsilon = \frac{\Pi}{y_1}, \quad (11)$$

где  $y_1$  – величина упругого перемещения на первом переходе.

Тогда зависимость (8) примет вид

$$\tau = B \cdot \frac{\ln \varepsilon_{\text{сум}}}{\ln \frac{\Pi}{y_1}} \cdot \frac{\Pi}{y_{\text{сум}1}}. \quad (12)$$

Подставим в (12) зависимость (1), считая  $y_1 = y$ ;  $x = \Pi / y_{\text{сум}1}$ :

$$\tau = B \cdot \frac{\ln \varepsilon_{\text{сум}}}{\ln \left[ \frac{x}{(1 - e^{-x})} \right]} \cdot x. \quad (13)$$

Как видно, величина  $x$  (или  $y_{\text{сум}1}$ ) неоднозначно влияет на основное время обработки  $\tau$ , т.е. имеет место экстремум функции  $\tau$  от величины  $y_{\text{сум}1}$ . Для определения экстремума функции  $\tau$  продифференцируем зависимость (13) по величине  $y_{\text{сум}1}$  и полученное выражение приравняем к нулю. После соответствующих преобразований приходим к уравнению, содержащему неизвестную величину  $y_{\text{сум}1}$ :

$$\ln \left[ \frac{x}{(1 - e^{-x})} \right] = 1 - \frac{x \cdot e^{-x}}{(1 - e^{-x})}. \quad (14)$$

Численными расчетами установлено, что решением уравнения является значение  $x = \Pi / y_{\text{сум}1} = 0,4$ . Исходя из табл. 1, это соответствует  $y_1 / y_{\text{сум}1} = 0,329$ . Уточнение на переходе равно  $\varepsilon = \Pi / y_1 = 1,215$ . Таким образом,

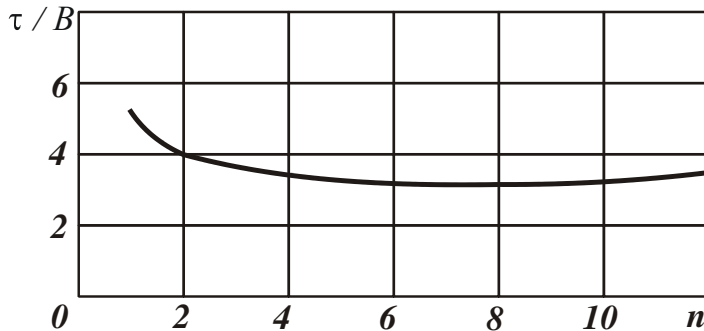


Рис. 6. Изменение функции  $\tau/B$  в зависимости от  $n$  для  $\varepsilon_{\text{сум}} = 5,376$ .

определено экстремальное (оптимальное) уточнение  $\varepsilon$ . Суммарное уточнение  $\varepsilon_{\text{сум}}$ , определяемое зависимостью (9), можно представить в виде

$$\varepsilon_{\text{сум}} = 1,215^n. \quad (15)$$

Минимум  $\tau_{\text{min}} = 0,4 \cdot n \cdot B$ , где

$$n = \frac{\ln \varepsilon_{\text{сум}}}{\ln \varepsilon} = \frac{\ln 5,376}{\ln 1,215} = \frac{0,68}{0,2} = 3,4.$$

Тогда  $\tau_{\text{min}} = 0,4 \cdot 8 \cdot B = 3,2 \cdot B$ .

Как видно, значение  $\tau_{\text{min}} = 3,2 \cdot B$  не столь существенно отличается от значения  $\tau_{\text{min}} = 4 \cdot B$ , полученного при  $n=2$  и  $\varepsilon=2,32$ , рис. 6. Следовательно, практически с одинаковой производительностью обработки можно шлифование вести в диапазоне  $n=2 \dots 8$ , т.е. при изменении уточнения  $\varepsilon$  в пределах  $1,215 \dots 2,3$ .

На рис. 7 показан характер изменения функции  $\tau/B$  в зависимости от количества переходов  $n$  для  $\varepsilon_{\text{сум}} = 100$ . Экстремальное значение  $n = \frac{\ln \varepsilon_{\text{сум}}}{\ln \varepsilon}$



$\frac{\ln 100}{\ln 1,215} = \frac{4,6}{0,2} = 23$ , соответственно  $\tau_{min} = 0,4 \cdot 23 \cdot B = 9,2 \cdot B$ . Как следует из рис.

7, в диапазоне  $n=4 \dots 23$  основное время обработки  $\tau/B$  изменяется не существенно (в пределах  $9,2 \dots 12$ ). Поэтому практически с минимальным основным временем обработки можно вести шлифование при  $n=4-5$  (т.е. при  $\varepsilon=2,5-3,15$ ), поскольку дальнейшее увеличение количества переходов  $n$  не создает ощутимого эффекта снижения  $\tau/B$ .

Если в зависимости (1) ограничиться лишь первым множителем, т.е. представить упругое перемещение на первом переходе  $y_1$  в виде

$$y_1 = B \cdot V_1, \quad (16)$$

то зависимость (2) с учетом (10) и  $\varepsilon = \Pi / y_1$  упростится:

$$\tau = B \cdot n \cdot \frac{\Pi}{y_1} = B \cdot \frac{\ln \varepsilon_{сум}}{\ln \varepsilon} \cdot \varepsilon. \quad (17)$$

В итоге пришли к экстремальной зависимости  $\tau$  от уточнения  $\varepsilon$  на переходе. Для определения экстремального значения  $\varepsilon$  подчиним функцию

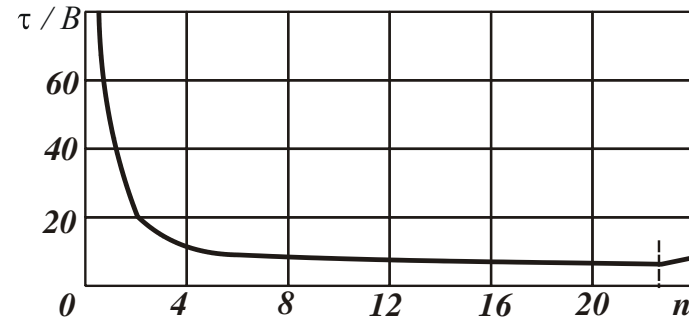


Рис. 7. Изменение функции  $\tau/B$  в зависимости от  $n$  для  $\varepsilon_{сум} = 100$ .

$\tau$  необходимому условию экстремума:  $\tau'_\varepsilon = 0$ . Тогда

$$\varepsilon = e \quad \text{или} \quad \varepsilon_{сум} = e^n. \quad (18)$$

Экстремальное значение уточнения  $\varepsilon$  равно числу  $e \approx 2,72$ . В табл. 3 приведены значения  $\tau/B \cdot \ln \varepsilon_{сум}$ , рассчитанные по зависимости (17). В точке экстремума реализуется минимум основного времени обработки  $\tau$ .

Как показано выше, на основе уточненного решения (15), минимум основного времени обработки не столь значительно отличается от значения  $\tau$  для  $\varepsilon = e \approx 2,72$ . Поэтому практически с одинаковой эффективностью обработку можно вести как с оптимальным уточнением  $\varepsilon = 1,215$ , так и с уточнением  $\varepsilon = e \approx 2,72$ . Причем, в последнем случае не требуется применения большого количества переходов  $n$ , что упрощает процесс обеспечения требуемой точности обработки.

Таблица 3

Расчетные значения  $\tau/B \cdot \ln \varepsilon_{сум}$

$\varepsilon$	1,5	2	$e \approx 2,72$	3	4	6
$\tau/B \cdot \ln \varepsilon_{сум}$	3,658	2,857	$e \approx 2,72$	2,727	2,877	3,33

Решение (18) было получено нами в работе [4] другим методом на основе упрощенной зависимости (16) для определения величины упругого перемещения. На практике в технологии машиностроения для определения

количества операций или переходов пользуются эмпирической зависимостью [5]:

$$k_j = \frac{\lg \varepsilon_{0j}}{a}, \quad (19)$$

где  $a$  – коэффициент ( $a=0,45-0,5$ ;  $j=d$ ;  $R_z$ ;  $\Delta$  – индекс, обозначает параметр геометрического размера, параметр шероховатости и параметр взаимного расположения поверхностей).

Зависимость (19) можно представить в виде:

$$\varepsilon_{d_0} \approx 3,1^{k_j}. \quad (20)$$

В результате приходим к зависимости, фактически идентичной зависимости (18), рассматривая  $n = k_j$ . Это свидетельствует о достоверности полученного теоретического решения. Таким образом, предложенный в работе теоретический подход позволяет приблизить расчетные данные к экспериментальным, что открывает новые возможности в изыскании условий повышения эффективности механической обработки.

### Список литературы

1. Маталин А.А. Технология машиностроения: Учебник. – Л.: Машиностроение, Ленинград. отд-ние, 1985. – 496 с.
2. Физико-математическая теория процессов обработки материалов и технологии машиностроения / Под общ. ред. Ф.В. Новикова и А.В. Якимова. В десяти томах. – Т. 1. "Механика резания материалов" – Одесса: ОНПУ, 2002. – 580 с.
3. Физико-математическая теория процессов обработки материалов и технологии машиностроения / Под общ. ред. Ф.В. Новикова и А.В. Якимова. В десяти томах. – Т. 7. "Точность обработки деталей машин" – Одесса: ОНПУ, 2004. – 546 с.
4. Технологія машинобудування: Підручник / О.В. Якимов, В.М. Царюк, О.О. Якимов, Г.О. Оборський, В.П. Ларшин, О.В. Самойленко. – Одеса: Астропринт, 2001. – 608 с.
5. Новиков Ф.В., Ковальчук А.И. Оптимизация структуры и параметров операций шлифования валов приводов шахтных конвейеров // Труды 14-й Международной научно-технической конференции. Физические и компьютерные технологии. – Харьков: ХНПК "ФЭД", 2008. – С. 3-13.