



УДК 621.941–229.01

© В. И. Кулик, 2007

О СМЕЩЕНИИ МАКСИМУМА СИЛЫ РЕЗАНИЯ ПРИ ТАНГЕНЦИАЛЬНОЙ ОБРАБОТКЕ

Кулик В. И. – канд. техн. наук, доц. кафедры «Компьютерное проектирование и сертификация машин» (ТОГУ)

В настоящей работе результаты экспериментальных исследований, обнаружившие явления смещения максимума силы резания относительно начального её появления при прерывистом резании с переменной толщиной среза, что характерно для тангенциальной обработки, объясняются, прежде всего, конструктивными особенностями станка и методом (встречным или попутным) резания, а не механизмом процесса резания. Обнаружено уменьшение потребляемой мощности в момент резания по сравнению с холостым ходом в цепи подач при попутном методе обработки. При встречных методах обработки потребляемая мощность в цепи подач в момент резания всегда больше потребляемой на холостом ходу. Кроме того, при встречном методе обработки время снятия припуска (время резания) увеличивается, а при попутном методе обработки время снятия припуска (время резания) уменьшается. При встречном методе обработки максимум силы резания запаздывает, а при попутном наступает раньше, чем предсказывают теоретические расчёты.

The article deals with the experimental results of the maximum cutting power displacement of its initial position under faltering cutting with variable thickness of a cut. It is characteristic of tangential processing and can be explained by the machine tool design or by the method (counter or passing) of cutting, but not by the cutting process. Reduction of power consumption is revealed at the moment of cutting as compared to the idling running in a circuit of submissions with a passing method of processing. If counter methods are used, power consumed in the circuit of submissions is always greater than at the idle running. If a counter method of processing is used the period of allowance removal (cutting period) increases. If a passing method is used the period of allowance removal (cutting period) decreases. With a counter method of processing the maximum power cutting is overdue, with a passing method it occurs earlier than the theoretical calculations forecast.

Процесс обработки деталей с тангенциальной подачей характеризуется резанием с переменной толщиной среза. Прерывистое резание и

переменность толщины среза обуславливает прерывистость и переменность силы при измерении её на резце.

В работе [1] делается вывод, что в условиях прерывистого резания, как при встречных, так и попутных методах обработки, наблюдаются «явления запаздывания сил резания», и объясняется это в первую очередь контактными процессами в трущейся паре резец – деталь.

В настоящей работе результаты экспериментальных исследований, обнаружившие явления смещения максимума силы резания относительно начального её появления при прерывистом резании с переменной толщиной среза, что характерно для тангенциальной обработки [2, рис. 1], объясняются, прежде всего, конструктивными особенностями станка и методом резания, а не механизмом процесса резания.

Зная изменения толщины среза, можно судить и о характере изменения силы резания.

Так при встречном и попутном точении (рис. 1) наружной поверхности тела вращения инструментом внешнего касания изменение толщины среза определяется по формуле [5]:

$$a_{\max} = \sqrt{A^2 + R_1^2 - 2AR_1 \cos\left(\varphi_{1t} - \frac{n_1}{n_2} \cdot 2\pi\right)}.$$

При выводе кинематических зависимостей мы пользовались понятием центроид инструмента и детали и мгновенного центра их вращения [2]. При постоянном отношении чисел оборотов инструмента и детали ($\frac{n_1}{n_2} = \text{const.}$) абсолютные числа оборотов n_1 и n_2 и направле-

ния их вращения могут быть различными, что затрудняет анализ и математические преобразования при выводе кинематических зависимостей. Используя же свойство центроид: $\frac{r_1}{r_2} = \frac{n_2}{n_1} = \frac{\omega_2}{\omega_1} = \frac{\varphi_2}{\varphi_1}$ и изменяя

отношение чисел оборотов отношением радиусов центроид, мы упрощаем преобразования, приводим формулы к единой размерности, а центроиды, к тому же связаны между собою и геометрическими параметрами схемы обработки дополнительной зависимостью:

$$|r_1 \pm r_2| = A = |R_1 \pm R_2|.$$

Здесь φ_{1t} – угол контакта инструмента с заготовкой, определяемый припуском t , R_i – радиус инструмента или детали, A – межцентровое расстояние, n_i – число оборотов в минуту, r_i – радиус центроиды, ω_i – угловая скорость, φ_i – угол поворота. Параметры с индексом 1 относятся к инструменту, а с индексом 2 – к детали, центроиды на рис. 1 изображены пунктирными линиями

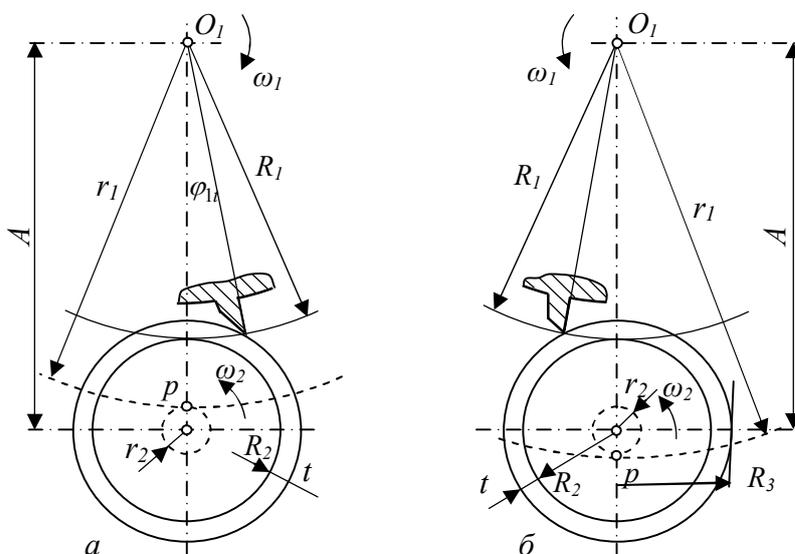


Рис. 1. Обработка наружной поверхности тела вращения инструментом с внешними зубьями: а – попутное точение, б – встречное точение, где: A – межцентровое расстояние; R_1 и R_2 – радиус инструмента и детали, R_3 – радиус заготовки, φ_{1t} – угол контакта инструмента с деталью, определяемый припуском, t – припуск, r_1 и r_2 – радиусы центроид инструмента и детали (центроиды показаны пунктирными линиями), ω_1 и ω_2 – угловые скорости инструмента и детали, p – полюс (центр мгновенного вращения)

Из кинематических соотношений можно рассчитать как время контакта резца с деталью, т. е. время резания заготовки, так и время появления максимальной толщины среза (рис. 2).

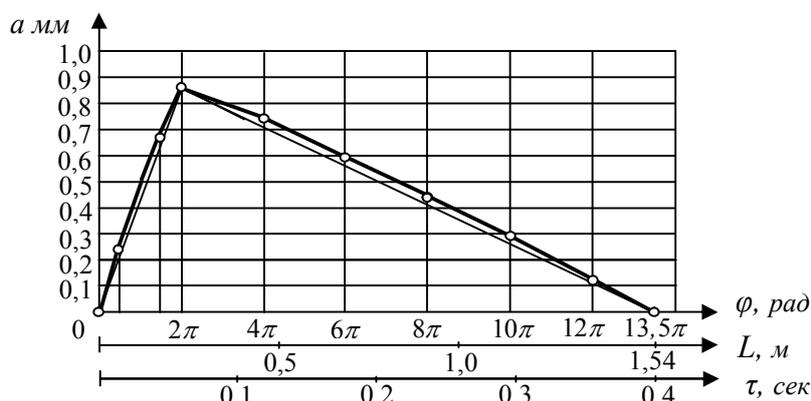


Рис. 2. График изменения толщины среза для схемы резания по рис. 1, а с параметрами: $A = 258,16$ мм – межцентровое расстояние; $D_1 = 447,42$ мм – диаметр инструмента; $t = 3$ мм – глубина обработки (припуск); $n_2 = 1000$ об/мин – частота вращения детали; $n_1 = 1,56$ об/мин – частота вращения инструмента; φ_2 = угол поворота детали с момента контакта резца с деталью, т. е. с момента начала резания, рад; L – путь резания, мм; τ – время резания, с

Максимальная толщина среза и время её появления определяются из рассматриваемой схемы резания (см. рис. 1) при условии абсолютного постоянства скоростей механизмов станка, осуществляющих движение инструмента и детали, т. е. постоянства чисел оборотов инструмента n_1 и детали n_2 .

Постоянство скоростей механизмов станка не имеет места при начале резания по причине возникновения сил резания, действующих на резец и деталь. Силы упруго скручивают, выбирая зазоры в кинематических парах, кинематические цепи привода инструмента и детали. Это приводит к тому, что нарушается постоянство отношения чисел оборотов инструмента и детали, нарушаются кинематические зависимости. Толщина среза меняется по величине, а максимальная толщина появляется со сдвигом во времени по отношению к рассчитанному из кинематики при постоянстве n_1 и n_2 , а точнее при $\frac{n_1}{n_2} = const$. Если

измеряется максимальная сила резания, действующая непосредственно на резец, то при прочих равных условиях она должна определяться максимальной толщиной среза, т. е. максимум силы и толщины среза должен появляться в один и тот же момент времени.

Экспериментальные исследования процесса резания в условиях встречного и попутного течения проводились на станке (спроектированном автором, изготовленном в г. Хабаровске), выполненном по принципиальной схеме резания, (см. рис. 1) конструктивная схема которого показана на рис. 3.

Станок состоит из корпуса 1 и фланца 2. К фланцу 2 крепятся два электродвигателя D_1 и D_2 . В корпусе 1 размещены два шпинделя: шпиндель детали 3 и шпиндель инструмента 4. Шпиндель 3 посредством шпоночного соединения соосно соединён с валом электродвигателя D_2 . Шпиндель 4 приводится во вращение через волновую зубчатую пару, выполненную следующим образом: на шпинделе 4 посредством шпоночного соединения жёстко закреплён гибкий венец 5, находящийся в зацеплении с податливым венцом 6, который неподвижно закреплён в корпусе 1.

Гибкий венец разжимается (обеспечивая нормальное рабочее положение зубьев обоих венцов) генератором волн, состоящим из двух дисков 7, которые посредством подшипников качения установлены на соответствующих эксцентричных втулках 8, зафиксированных на валу 9. Двухдисковый генератор обладает малым моментом инерции, так как диски 7 с большим радиусом инерции имеют сравнительно малую скорость вращения, что важно при больших диаметрах гибкого венца. Эта особенность использована для увеличения чувствительности при-



вода к изменению нагрузки и обратимости передачи. Двухдисковый генератор выполнен с диаметром дисков 7, равным $230^{+0,030}$ мм и эксцентриситетом осей втулок 8, равным $e = 2,8^{+0,007}_{-0,003}$ мм. Вал 9 установлен на подшипниках качения, один из которых вмонтирован в крышку 10, зафиксированную в корпусе 1, а другой – вмонтирован в торцевое гнездо шпинделя 4. Вал 9 и шпиндель 4 расположены соосно. В крышке 10 имеются два отверстия, в которые вставляется стакан 11 с осью и промежуточными сменными колёсами. На шпинделе 3 имеется цанговый зажим для крепления заготовки 12, а на шпинделе 4 закреплён суппорт 13, на котором крепятся резцовые блоки 14.

Изменение чисел оборотов суппорта 13 осуществляется через сменные шестерни либо от четырёхскоростного электродвигателя D_1 (см. пунктирные линии на рис. 3), либо от электродвигателя D_2 . В последнем случае оба шпинделя получают вращение от одного электродвигателя. Станок снабжён пультом управления, который позволяет раздельное включение обоих электродвигателей и их реверс.

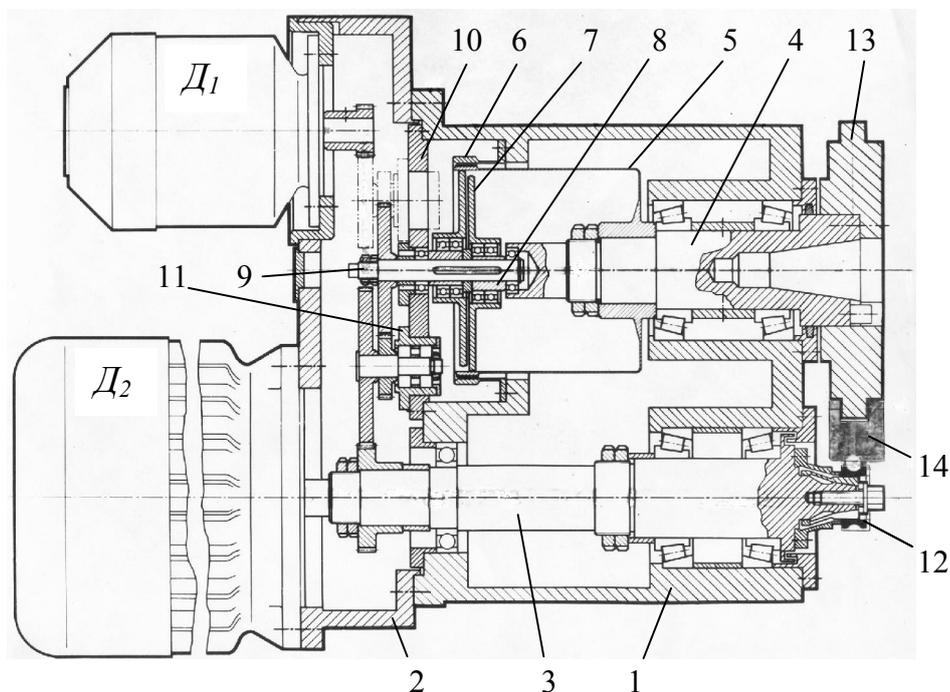
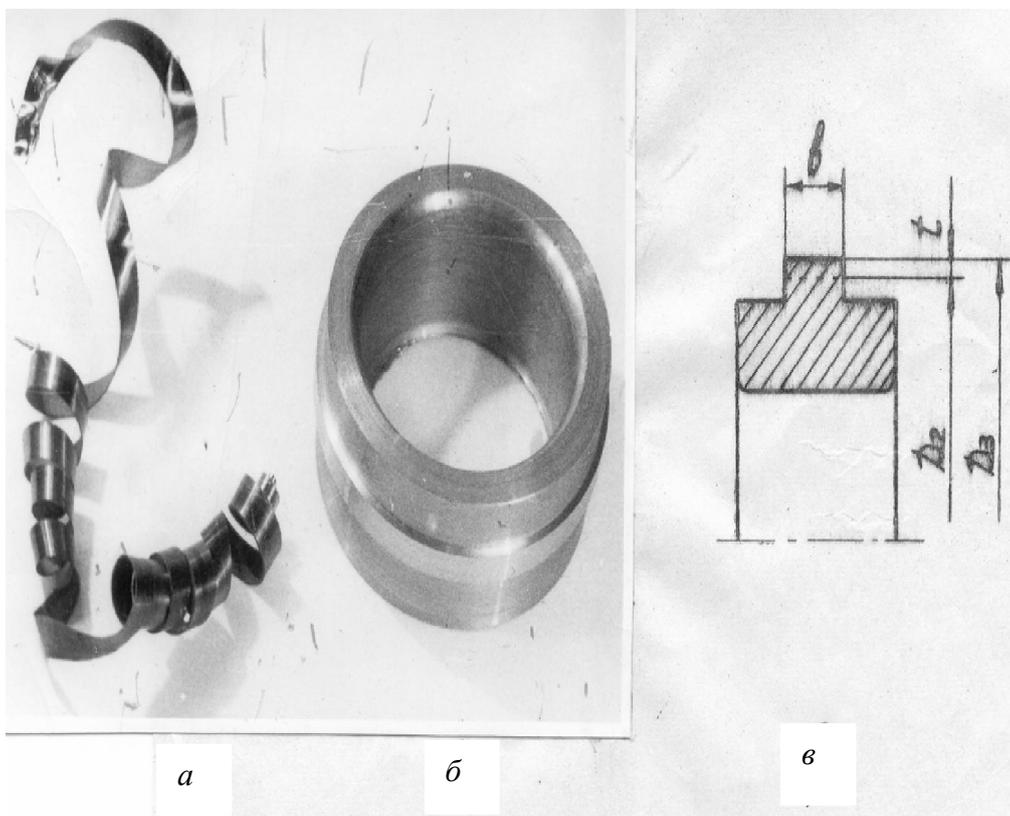


Рис. 3. Схема станка с волновой зубчатой парой в приводе вращения резцового блока

В качестве обрабатываемого материала использовалась сталь ШХ 15 ГОСТ 801-60, НВ = 207, относительное удлинение равно 19 %. Каждая заготовка предварительно протачивалась и имела бурт для свободного резания (рис. 4).



Вид заготовки и стружки:

Рис. 4, а – стружка снятая при записи процесса резания по рис. 5; б – обработанная деталь; в – эскиз заготовки, где t – глубина обработки (припуск); b – ширина резания, D_2 – диаметр обработанной детали, D_3 – диаметр заготовки

Материал режущей части резца – пластина твёрдого сплава Т15К6 ГОСТ 8720-58. Заточка пластин производилась на станке ЗБ642 алмазным чашечным кругом, диаметром 150 мм с зерном АСП8 100 % концентрации на бакелитовой связке, шероховатость поверхностей соответствовала 9 классу чистоты по ГОСТ 2789-59. Пластина Т15К6 закреплялась механически в корпусе резцового блока при помощи цапфы.



Были определены и характеристики жёсткости узлов станка. Жёсткость шпиндельных узлов детали и суппорта в радиальном направлении определялась в плоскости предполагаемых сил резания в трёх положениях каждого шпинделя (поворот шпинделя осуществлялся через 120 °). Средняя жёсткость шпиндельных узлов O_1 и O_2 (см. рис. 3) составила $j_y = 16\ 000$ кг/мм. Оба шпинделя установлены в обыкновенных подшипниках: роликовых, конических однорядных №7518 по ГОСТ333-59.

Крутильная жёсткость определялась нагружением тихоходного вала цепи подачи, т. е. суппорта, без фиксации входного вала цепи подачи в трёх положениях суппорта (поворот шпинделя суппорта осуществлялся через 120 °). Средняя крутильная жёсткость

$$j_\varphi = 2400 \text{ кг/мм} \rightarrow 5,07 \cdot 10^4 \text{ кг} \cdot \text{см/см} \rightarrow 1,03 \cdot 10^4 \text{ кг} \cdot \text{м/рад}.$$

На рис. 5, а для случая попутного точения и на рис. 6, а для случая встречного точения показаны осциллограммы записи:

- 1 – неравномерности вращения резцового суппорта,
- 2 – тангенциальной составляющей силы резания на резце,
- 3 – мощности, потребляемой приводом подачи, т. е. приводом вращения резцового суппорта.

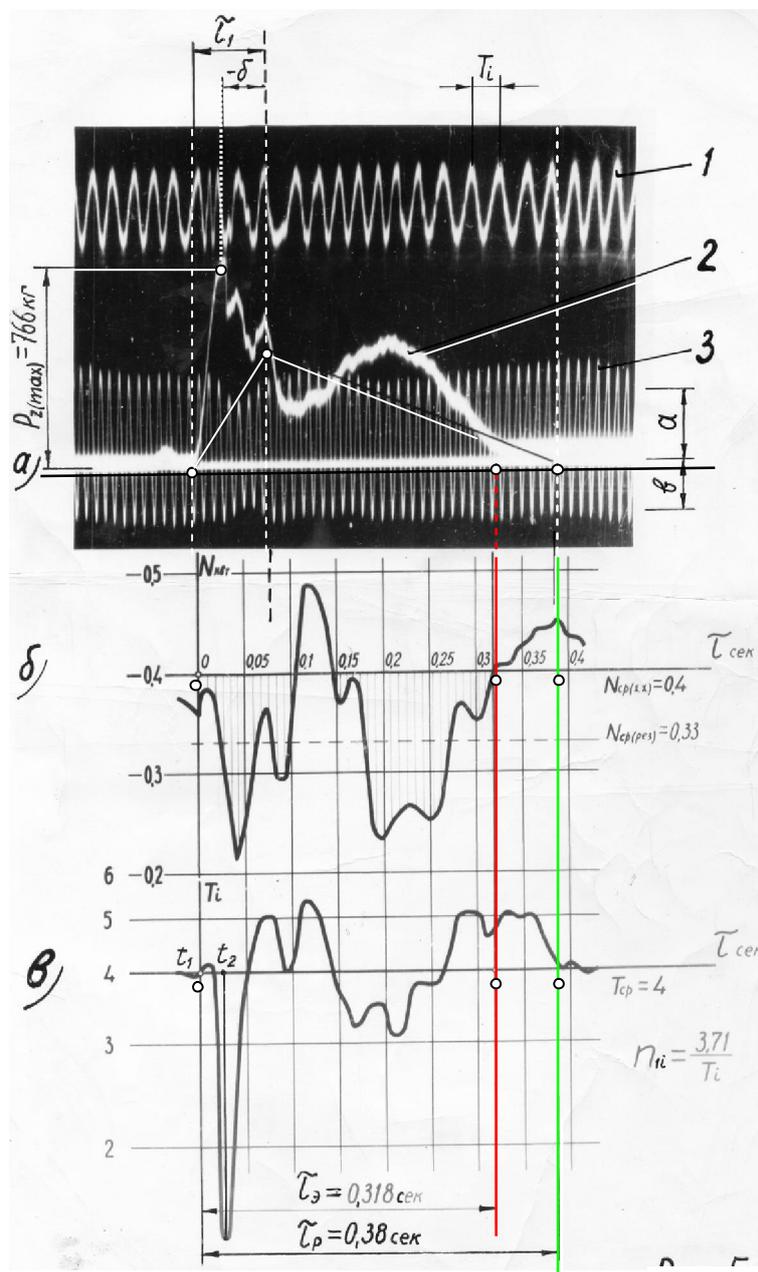


Рис. 5. Попутное точение: $R_1 = 225,8 \text{ мм}$; $R_2 = 34,2 \text{ мм}$, $i = 0,95 \text{ мм}$;

$v = 6,2 \text{ мм}$; $n_1 = 0,926 \text{ об / мин}$; $n_2 = 890 \text{ об / мин}$.

а – осциллограммы: 1 – неравномерности вращения резцового суппорта,

2 – силы резания, 3 – мощности, потребляемой приводом подачи;

б – график изменения мощности, потребляемой приводом вращения резцового суппорта (расшифровка осциллограммы – 3);

в – график неравномерности вращения резцового суппорта (расшифровка осциллограммы – 1)



Резание велось без охлаждения. Для измерения составляющей силы резания P_z использовался специальный динамометр с тензодатчиками, которые предварительно тарировались. Запись силы резания производилась на осциллографе Н102 через усилитель ТА-5.

Так как в условиях попутного или встречного точения резец участвует в работе короткое время, то для записи и измерения мощности был использован малоинерционный специальный вибратор Д1-ХП, а в качестве регистрирующего прибора – осциллограф Н102.

Тарирование вибратора проводилось нагружением суппорта станка при одновременном снятии показаний ваттметром и записи осциллограммы на плёнку. Были построены тарировочные графики изменения мощности, потребляемой электродвигателем подачи. Методика расшифровки осциллограмм записи мощности [3] позволяет установить связь между значениями мощности и величинами $\frac{a-b}{2}$, (см. рис. 5, а), которая оказалась выраженной для привода подач D_I линейной зависимостью:

$$N = 0,39 \cdot \frac{a-b}{2} \text{ – при записи на плёнку,}$$

$$N = 0,117 \cdot \frac{a-b}{2} \text{ – при расшифровке осциллограммы по рис. 5 и 6, при}$$

этом, необходимо иметь в виду, что 0,05 с соответствуют 10 мм.

Так, например, для времени $\tau = 0,04$ с (рис. 5) амплитуда $a = 14,2$ мм, $b = 10,6$ мм. В этот момент потребляемая электродвигателем мощность

$$N = 0,117 \cdot \frac{a-b}{2} = 0,21 \text{ кВт.}$$

Так как при точении величина круговой подачи резца незначительна (суппорт делает около одного оборота в минуту), то для записи неравномерности вращения его в процессе резания был специально сконструирован и изготовлен растровый прибор разрешающей способностью в $00^\circ 08'$. Расшифровка осциллограмм записи неравномерности вращения резцового суппорта проводилась по методике [5].

Зная скорость движения осциллограммы $v = 50$ мм/с, число рисок на диске прибора $z = 2700$, измерив шаг T выступов на осциллограмме, (рис. 5, а и 6, а), определяем скорость вращения суппорта (т. е. среднее

значение n_i за время одного периода T_i): $n_i = \frac{B}{T_i}$ или $\lg n_i = \lg B - \lg T_i$,

где $B = 60v/z$ – постоянная прибора.

Обработка осциллограмм проводилась как на плёнке, так и на фотобумаге. Масштаб в этом случае различен.

$$B = 1,112 \text{ – при записи на плёнку,}$$

$$B = 3,71 \text{ – для рис. 5,}$$

$$B = 3,66 \text{ – для рис. 6.}$$

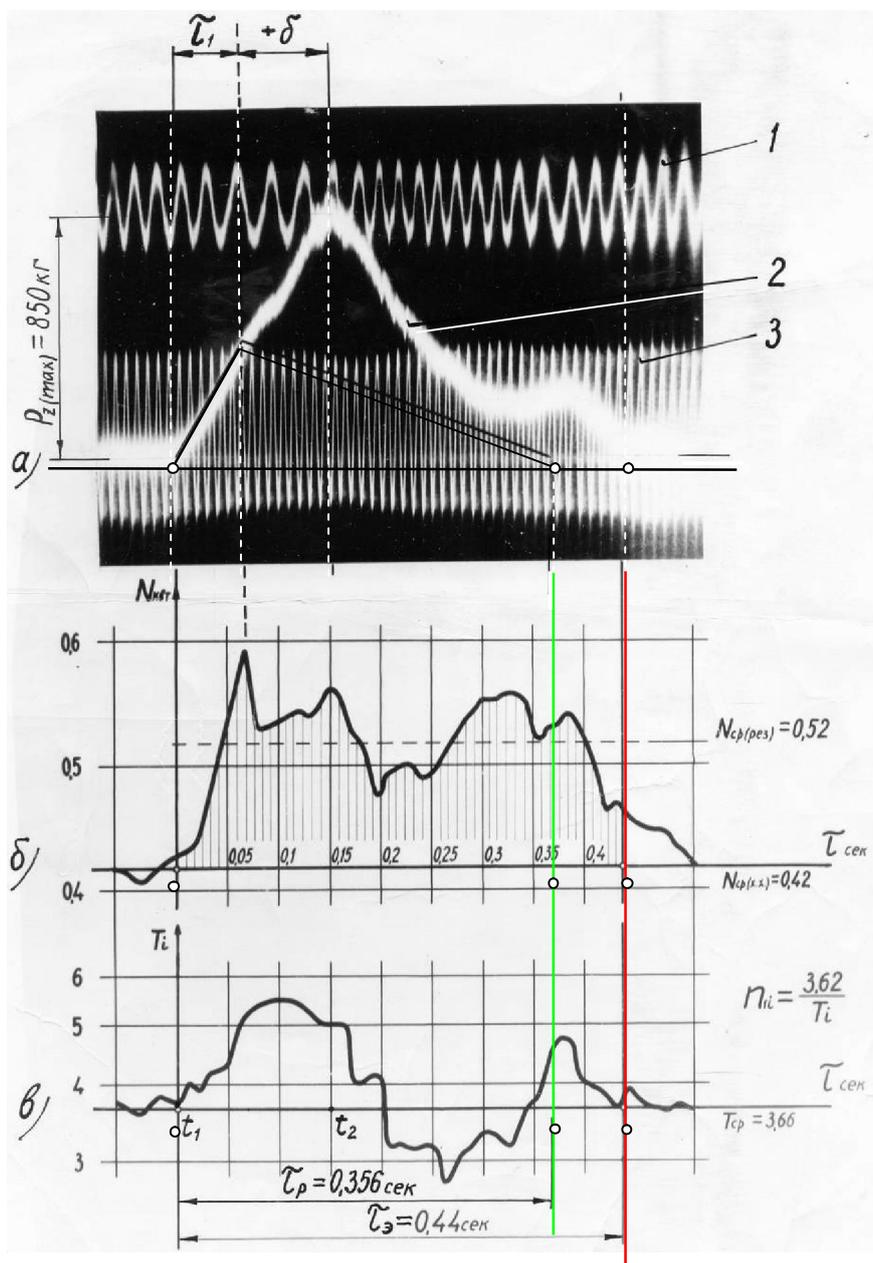


Рис. 6. Встречное точение: $R_1 = 226,65 \text{ мм}$; $R_2 = 33,35 \text{ мм}$; $t = 0,9 \text{ мм}$;

$v = 6,8 \text{ мм}$; $n_1 = 0,99 \text{ об / мин}$; $n_2 = 950 \text{ об / мин}$.

- а – осциллограммы: 1 – неравномерности вращения резцового суппорта,
 2 – силы резания, 3 – мощности, потребляемой приводом подачи;
 б – график изменения мощности, потребляемой приводом вращения резцового
 суппорта (расшифровка осциллограммы – 3);
 в – график неравномерности вращения резцового суппорта (расшифровка осцилло-
 граммы – 1)



Поскольку в процессе резания суппорт испытывает крутильные колебания, то его скорость вращения будет изменяться, шаг кривой на осциллограмме будет при этом переменной величиной, зависящей от времени τ , (рис. 5, в и 6, в). Так, например, для $\tau = 0,3$ с (рис. 5) шаг $T = 5,1$ мм. В этот момент средняя скорость вращения суппорта $n_1 = \frac{3,71}{T} = 0,73$.

Итак, на рис. 5, а по расшифрованной осциллограмме – 3 построен график изменения мощности, потребляемой приводом подач, из которого видно, что в момент резания потребляемая средняя мощность была $N_{cp(рез)} = 0,33$ кВт, т. е. меньше, чем на холостом ходу, а именно: $N_{cp(хх)} = 0,4$ кВт.

На рис. 5, в по расшифрованной осциллограмме – 1 построен в полулогарифмических координатах график неравномерности вращения резцового суппорта, из которого можно найти число оборотов резцового суппорта для любого момента времени. Например, в момент холостого хода точки t_1 число оборотов резцового суппорта равно: $n_1' = \frac{3,71}{4} = 0,93$. А в момент резания, например, для точки t_2 имеем $n_1'' = \frac{3,71}{1,4} = 2,65$.

Таким образом, при попутном точении в момент начала резания, когда резец «захватывается» деталью, вращение суппорта ускоряется. При этом мгновенная скорость вращения в условиях эксперимента, (рис. 5, в), точка t_2 увеличилась почти в 3 раза, а время снятия припуска расчётное $\tau_p = 0,38$ с (рассчитанное по законам кинематики при условии, что число оборотов резцового суппорта и детали в момент резания остаётся тем же, что и на холостом ходу, т. е. тем же, что и до контакта резца с деталью – неизменным) уменьшается при резании и в условиях эксперимента составило $\tau_p = 0,318$ с.

Напротив, из рис. 6, б, где построен график мощности, потребляемой приводом подач при встречном точении, видно, что в момент резания потребляемая средняя мощность ($N_{cp(рез)} = 0,52$ кВт) больше, чем на холостом ходу, а именно: $N_{cp(хх)} = 0,42$ кВт.

Из рис. 6, в, где построен график неравномерности вращения резцо-

вого суппорта при встречном точении, можно найти число оборотов резцового суппорта в момент холостого хода, точка t_1 , т. е. $n_1' = \frac{3,62}{3,66} = 0,99$.

А в момент резания, например, для точки t_2 , имеем $n_1'' = \frac{3,62}{5} = 0,725$.

В станках, работающих встречным методом обработки, в момент начала резания происходит замедление вращения шпинделя с резцовым суппортом, а время снятия припуска по сравнению с расчётным $\tau_p = 0,356$ с увеличивается при резании, и в условиях эксперимента составило $\tau_s = 0,44$ с (рис. 6).

Итак (промежуточные выводы работы):

1. При встречном точении в момент резания вращение суппорта замедляется, время снятия припуска удлиняется, мощность, потребляемая приводом подач, увеличивается по сравнению с холостым ходом.

2. При попутном точении в момент резания вращение суппорта ускоряется, время снятия припуска сокращается, мощность, потребляемая приводом подач, уменьшается по сравнению с холостым ходом.

Попробуем теперь проследить, куда смещается во времени максимум силы резания при попутном и встречном методах обработки.

На рис. 5 и 6 проведены вертикальные пунктирные линии, соответствующие времени τ_1 одного оборота детали с момента начала резания. Кинематические зависимости [4, 5] указывают, что в этот момент при постоянных оборотах резцового суппорта и детали должно появляться максимальное сечения среза, а следовательно, и максимальная сила резания (время появления максимальной силы резания и максимального сечения среза синхронно).

Однако, как показано раньше, при встречном точении вращение резцового суппорта замедляется (замедляется круговая подача резца), максимум сечения среза запаздывает, а следовательно, запаздывает появление и максимальной силы резания. На рис. 6 величина запаздывания максимальной силы резания относительно её расчётного появления (при отношении $\frac{n_1}{n_2} = const$) составляет во времени величину $+\delta$, а время появления максимума силы с момента контакта резца с деталью составляет



величину $\tau_1 + \delta$.

При попутном точении вращение резцового суппорта ускоряется (ускоряется круговая подача резца), максимум сечения среза появляется раньше, чем предсказывают кинематические расчёты, а следовательно, раньше появляется и максимальная сила резания. На рис. 5 величина преждевременного появления максимума силы относительно её расчётного появления (при отношении $\frac{n_1}{n_2} = const$) составляет во времени величину $-\delta$, а время появления максимума силы с момента контакта резца с деталью составляет величину $\tau_1 - \delta$.

В дальнейшем при резании происходит колебательный процесс, что видно из осциллограмм на рисунках, однако всегда величина силы P_{max} , измеренная на резце, определяется толщиной среза a_{max} , чем бы ни вызывалось изменение толщины среза и P_{max} появляется всегда в момент появления a_{max} .

Анализ различных схем, видов и методов обработки приводит к следующим выводам:

1. Смещение максимума тангенциальной силы резания, измеренной на резце, относительно начала её появления, т. е. начала резания, в станках тангенциальной обработки вызывается смещением времени появления максимальной толщины среза из-за нарушения постоянства отношения чисел оборотов инструмента n_1 и детали n_2 , т. е. отношения $\frac{n_1}{n_2} = const.$, в момент резания.

2. Запаздывание появления максимальной толщины среза, а следовательно, и максимальной тангенциальной силы резания должно наблюдаться:

а) для всех случаев «встречного резания»,

б) для случаев «попутного резания», когда скорость резания определяется вращением (движением) инструмента.

3. Преждевременное появление максимальной толщины среза, а следовательно, и максимальной тангенциальной силы резания должно на-



блюдаться только для случаев «попутного резания», когда скорость резания определяется вращением (движением) заготовки.

Библиографические ссылки

1. *Татлицкий Н. И.* Явления запаздывания усилий при прерывистом резании с переменной толщиной среза // Вестник машиностроения. 1969. № 4.
2. *Кулик В. И., Чернянский П. М.* Погрешности обработки, зависящие от кинематики резания // Известия вузов. Машиностроение. 1972. № 7.
3. *Прытков В. Т., Татлицкий А. В.* Курс электрических измерений. М.-Л. 1960.
4. *Этин А. О.* Кинематический анализ методов обработки металлов резанием. М., 1964.
5. *Кулик В. И.* Исследование кинематики и потоков мощности в станках тангенциальной обработки. М., 1973.