

УДК 621.91.01

Совершенствование процесса точения нежестких валов в условиях автоколебаний

В.М. Свинин^{1 a}, А.В. Самсонов^{1 b}, Д.А. Рычков^{2 c}¹Забайкальский государственный университет, ул. Александрово-Заводская 30, Чита, Россия²Братский государственный университет, ул. Макаренко 40, Братск, Россия^asvinin_vm@mail.ru, ^basamsonov1991@mail.ru, ^cdielektrik84@mail.ru

Статья поступила 2.06.2015, принята 16.08.2015

Точение нежестких валов длиной более 10 диаметров представляет серьезную технологическую проблему из-за возбуждения в них интенсивных автоколебаний, препятствующих нормальному проведению процесса резания. Одним из наиболее перспективных способов подавления автоколебаний в технологических системах, не требующих повышения их жесткости и применения демпферов, является введение между заготовкой и инструментом дополнительного касательного к поверхности резания колебательного контура. Реализация этого способа осуществляется с помощью пружинящего держателя канавочного резца и расточной головки. Другой способ подавления автоколебаний заключается в поднятии вершины проходного токарного резца выше оси заготовки на величину, соответствующую фактическому значению заднего угла. Однако возможность совмещения этих способов недостаточно изучена на практике. В связи с этим актуальной задачей является оценка эффективности гашения автоколебаний при точении нежестких валов. Для решения этой задачи было проведено экспериментальное исследование с использованием токарно-винторезного станка модели 16Б25Псп. В качестве заготовки применялся вал из стали 45 диаметром 23,3 мм и длиной 430 мм, который закреплялся в центрах станка. В качестве режущих инструментов использовались проходной и пружинящий резцы с режущими пластинами из твердого сплава Т5К10. Горизонтальные и вертикальные колебания заготовки и вертикальные колебания пружинящего резца регистрировались токовых реверсными датчиками, сигналы которых поступали на персональный компьютер через АЦП модели ZETLab 210. Проведенное исследование показало, что предложенная конструкция регулируемого пружинящего резца позволяет эффективно подавлять автоколебания при точении нежестких валов и может быть рекомендована для промышленного использования. В сочетании с приемом поднятия его вершины выше оси центров станка резец может обеспечить приемлемое качество обработанной поверхности без использования люнетов и дополнительных демпферов вибраций.

Ключевые слова: нежесткий вал; точение; пружинящий резец; гашение автоколебаний.

Improving the turning process for non-rigid shaft under self-oscillation

V.M. Svinin^{1 a}, A.V. Samsonov^{1 b}, D.A. Rychkov^{2 c}¹Trans-Baikal State University; 30, Alexandro-Zavodskaya St., Chita, Russia²Bratsk State University; 40, Makarenko St., Bratsk, Russia^asvinin_vm@mail.ru, ^basamsonov1991@mail.ru, ^cdielektrik84@mail.ru

Received 02.06.2015, accepted 16.08.2015

Turning on non-rigid shafts with the length of more than 10 diameters is a serious technological problem because of the excitement of intensive self-oscillations, preventing the cutting process being conducted in a proper way. One of the most promising methods of self-oscillation damping in technological systems that does not require them to increase the stiffness and to use dampers is to introduce additional oscillating circuit to the cutting surface between a workpiece and a tool. Implementation of this process is carried out via a spring holder of a grooving tool and a boring head. Another way to suppress self-oscillation is to raise the top of the passage of the turning tool above the axis of the workpiece by an amount corresponding to the actual value of the clearance angle. However, the possibility of combining these methods in practice has not been studied enough in practice. Therefore, an urgent task is to assess the effectiveness of self-oscillation damping under turning on non-rigid shafts. To solve this problem, an experimental study has been done by using a screw-cutting lathe, model 16B25Psp. As a workpiece, a steel shaft made of steel 45 with a diameter of 23.3 mm and a length of 430 mm has been used, which has been fixed at the centers of the machine. As cutting tools, a straight-turning tool and a spring cutter having cutter plates made of hard alloy metal T5K10 have been used. Horizontal and vertical oscillations of a workpiece and vertical oscillations of a spring cutter have been recorded by eddy-current sensors, which the signals have been gone to a personal computer by means of analog-to-digital converter ZETLab 210. The study showed that the proposed design of a controlled spring cutter allows suppressing self-oscillations effectively when turning non-rigid shafts and can be recommended for industrial use. Together with the method of raising its top above the axis of the centres of a machine tool, a cutter can provide an acceptable quality of a surface processed without using lunettes and additional vibration dampers.

Key words: non-rigid shaft; turning; spring cutter; self-oscillation damping.

Введение. Точение нежестких валов длиной более 10 диаметров представляет серьезную технологическую проблему из-за возбуждения в них интенсивных автоколебаний, препятствующих нормальному проведению процесса резания. Для их уменьшения при черновой обработке используют проходные резцы с углом $\varphi = 90^\circ$. При чистовом точении величина снимаемого припуска меньше радиуса при вершине резца, и поэтому среднее по длине режущей кромки значение угла φ не превышает 45° , неизбежно провоцируя возникновение автоколебаний.

Одним из наиболее перспективных способов подавления автоколебаний в технологических системах, не требующим повышения их жесткости и применения демпферов, является предложенное М.Е. Эльясбергом и И.А. Савиновым введение между заготовкой и инструментом дополнительного касательного к поверхности резания колебательного контура [1]. Для реализации этого способа ими были созданы конструкции пружинящего держателя канавочного резца и расточной головки. Применительно к продольному точению Д.А. Расторгуев и О.И. Драчев предложили конструкцию проходного резца с упругой головкой [2] и провели экспериментальное исследование, подтвердившее его эффективность [3]. Однако в опытах по точению нежестких валов было упущено выполнение основного условия способа М.Е. Эльясберга — настройки собственной частоты дополнительного контура в резонанс с частотой изгибных автоколебаний обрабатываемого вала. Тем самым потенциальные возможности этого способа оказались раскрытыми не в полной мере. Другой способ подавления автоколебаний, предложенный В.И. и Б.В. Леонтьевыми [4], заключается в поднятии вершины проходного токарного резца выше оси заготовки на величину, соответствующую фактическому значению заднего угла 3° . С целью оценки эффективности гашения автоколебаний этими способами при точении нежестких валов было проведено представленное ниже экспериментальное исследование.

Методика проведения исследований. Для проведения эксперимента была изготовлена установка с пружинящим резцом (рис. 1).

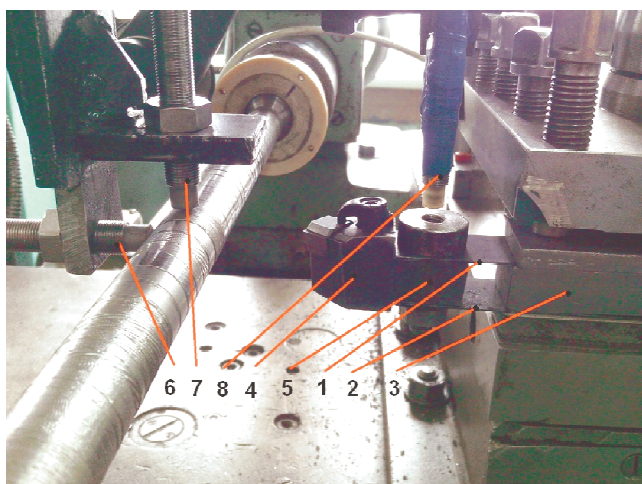


Рис. 1. Экспериментальная установка с пружинящим резцом

Резец представляет собой головку 4 стандартного резца, шейкой 5 поддерживаемую тонкими упругими

пластинами 1 и 2, между которыми расположена проставка 3, служащая для регулировки частоты собственных вертикальных колебаний резца путем изменения расстояния от нее до шейки при ослаблении винтов резцедержателя.

Опыты проводили на токарно-винторезном станке модели 16Б25Псп. Заготовки диаметром $d = 23,3$ мм и длиной 430 мм из стали 45 (HB = 198...200) закрепляли в центрах и обрабатывали без применения смазочно-охлаждающей жидкости поочередно стандартным проходным резцом с механически закрепленной четырехгранной режущей пластиной из твердого сплава Т5К10 ($\varphi = 45^\circ$, $\varphi_1 = 45^\circ$, $\alpha = 6^\circ$, $\gamma = -6^\circ$, $r = 0,8$ мм) и пружинящим резцом с теми же конструктивно-геометрическими параметрами. Выбор марки твердого сплава основан на рекомендациях по применению инструментальных материалов при обработке сталей, сплавов и композитов [5-6]. При этом формирование режущих кромок рекомендуется производить прогрессивным способом электроалмазного комбинированного шлифования [7-8].

В ходе опытов токовихревыми датчиками 6, 7, 8 модели AP2000A-08.05.0 регистрировали соответственно горизонтальные и вертикальные колебания заготовки и вертикальные колебания пружинящего резца. Сигналы от датчиков через АЦП мод. ZETLab 210 поступали на персональный компьютер, на экране которого отображались виброграммы колебаний заготовки в вертикальном и горизонтальном направлениях и головки резца. Для определения частотного спектра колебаний числовые массивы данных каждой виброграммы подвергали анализу Фурье с помощью программного комплекса «MatLab». По этим же массивам данных строили графики относительного движения заготовки и резца в плоскости, нормальной к поверхности резания, за четыре оборота заготовки.

При построении графиков в качестве данных для оси абсцисс брали сумму мгновенных значений вертикальных смещений заготовки и резца и текущего пути инструмента. Последний рассчитывали по формуле:

$$S = t \cdot v,$$

где t — текущее время, с; v — скорость резания, м/с.

Текущее время брали из исходных данных виброграмм. Скорость резания рассчитывали по действительной частоте вращения шпинделя, которую определяли по отметкам времени на осциллограмме, получаемой с помощью токовихревого датчика, установленного возле кулачков патрона. В качестве данных для оси ординат A использовали проекции на нормаль к поверхности резания мгновенных значений y амплитуды горизонтальных колебаний заготовки:

$$A = y \cdot \sin 45^\circ.$$

При построении графика первой траектории относительных колебаний заготовки и резца использовали набор данных, полученных за один оборот заготовки. Для следующей траектории учитывали данные, полученные за следующий оборот заготовки, и т. д. В ходе построения каждой последующей траектории данные для оси ординат уменьшали на толщину среза a :

$$a = S_0 \cdot \sin 45^\circ,$$

где S_0 — величина подачи на оборот, м/об.

Первую и вторую серии опытов провели с глубиной резания соответственно $t = 0,5$ и $0,25$ мм, подачей $S_o = 0,095$ мм/об и частотой вращения шпинделя n от 400 до 1000 об/мин.

Результаты и обсуждение. По результатам экспериментов получены виброграммы и спектрограммы колебаний заготовки, фотографии обработанных поверхностей и траектории колебаний заготовки относительно жесткого и пружинящего резцов. На рис. 2

представлены траектории движения заготовки относительно инструмента в сечении, перпендикулярном поверхности резания при точении жестким и пружинящим резцами.

Влияние скорости резания в обеих сериях опытов на амплитуды колебаний заготовки и пружинящего резца представлено на рис. 3, а на частоту и сдвиг фаз автоколебаний — на рис. 4.

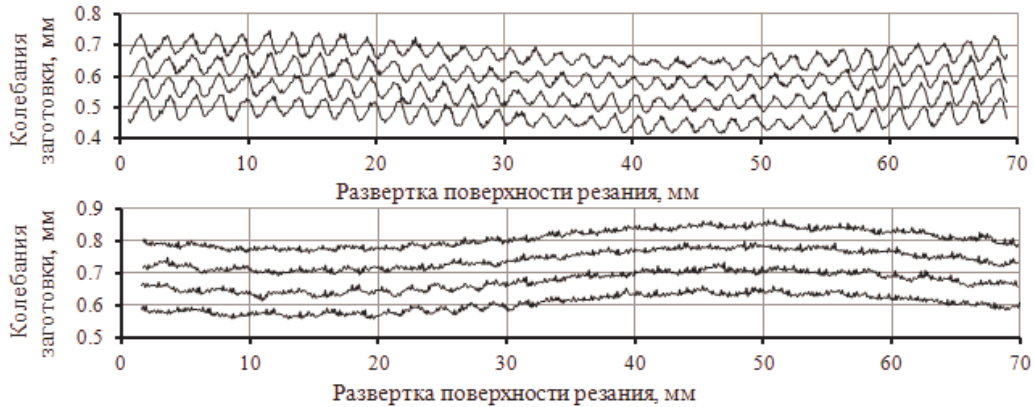


Рис. 2. Траектории движения заготовки относительно инструмента в сечении, перпендикулярном поверхности резания, при точении жестким (вверху) и пружинящим (внизу) резцами: $t = 0,25$ мм; $S_o = 0,095$ мм/об; $n = 400$ об/мин

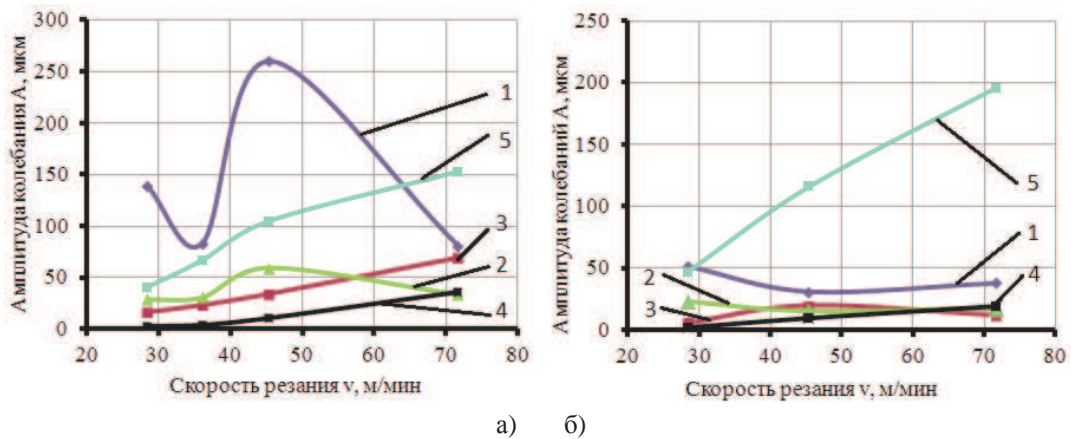


Рис. 3. Влияние скорости резания на амплитуду автоколебаний: а) — при $t = 0,5$ мм; б) — при $t = 0,25$ мм: 1 — вертикальных жестким резцом; 2 — горизонтальных жестким резцом; 3 — вертикальных пружинящим резцом; 4 — горизонтальных пружинящим резцом; 5 — вертикальных пружинящего резца; $S_o = 0,095$ мм/об.

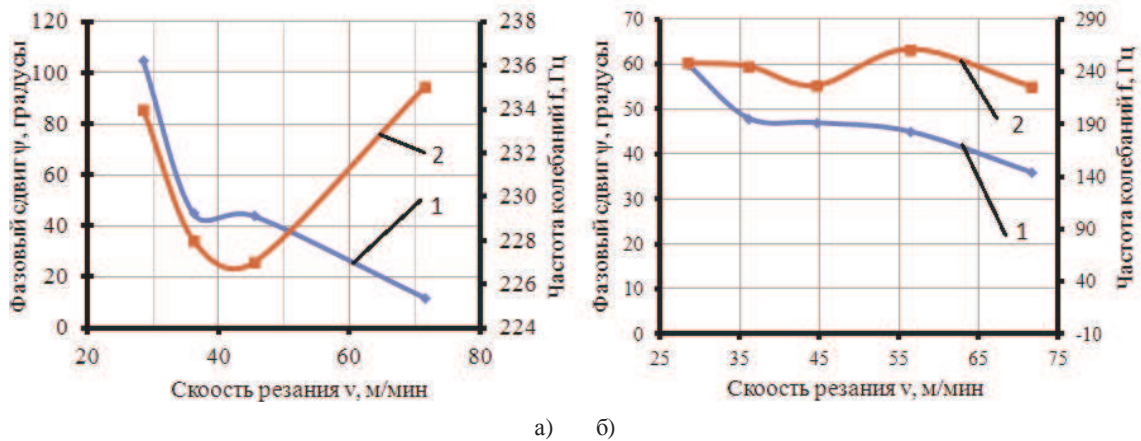


Рис. 4. Зависимость фазового сдвига (1) и частоты автоколебаний (2) от изменения скорости резания: а) — при $t = 0,5$ мм; б) — при $t = 0,25$ мм; $S_o = 0,095$ мм/об.

Опыты показали, что при работе жестким резцом происходит возбуждение интенсивных автоколебаний. На поверхности детали присутствуют недопустимые для чистовой обработки следы вибраций, которые на каждом проходе опережают предыдущий вибрационный след (рис. 2). С увеличением скорости резания v от 28 до 72 м/мин этот сдвиг фаз изменяется от 105 до 12° при $t = 0,5$ мм и от 60 до 36° при $t = 0,25$ мм (рис. 4). При этом также меняется и частота автоколебаний от 227 до 234 Гц в первой серии опытов и от 227 до 261 Гц во второй (рис. 4). Периодическое изменение частоты и фазы автоколебаний с ростом скорости резания подтверждается результатами и других исследователей [12–14].

Частоту собственных колебаний пружинящего резца в каждом опыте настраивали в резонанс с частотой автоколебаний заготовки в ходе точения жестким резцом при тех же условиях обработки. Виброграммы показали, что колебания резца происходят строго в противофазе к автоколебаниям заготовки в вертикальном направлении, и поэтому их можно считать вынужденными в резонансном режиме [23]. С увеличением скорости резания их амплитуда повышается (линия 5 на рис. 3). Во всем диапазоне изменения скорости и на обеих глубинах резания пружинящий резец обеспечил устойчивое подавление автоколебаний в вертикальном и горизонтальном направлениях (рис. 2...3). На обработанной поверхности исчезли следы вибраций.

Третья серия опытов была посвящена проверке рекомендации В.И. и Б.В. Леонтьевых [4] о подавлении автоколебаний путем поднятия вершины резца выше линии оси центров станка, которое в опытах принимали от 0,7 до 1,7 мм. Минимальное значение поднятия вершины резца определилось необходимостью компенсации экспериментально определенного вертикального отжатия вверх заготовки на 0,1 мм и отжатия вниз пружинящего резца на 0,6 мм силой резания при принятых условиях обработки. Для уменьшения высоты гребешков на обработанной поверхности на вершине режущей пластины заточили параллельное оси центров станка переходное лезвие с задним углом $\alpha = 8^\circ$ и длиной 0,5 мм. [9–10]. С целью повышения производительности обработки подачу увеличили до $S_o = 0,285$ мм/об., и точение вели при $t = 0,25$ мм и $n = 1250$ об/мин ($v = 96$ м/мин). Обработку также чередовали жестким и пружинящим резцами. Влияние высоты поднятия вершины пружинящего резца на внешний вид обработанной поверхности и амплитуды колебаний заготовки и резца показано соответственно на рис. 5 и 6.

При высоте поднятия $h = 0,7$ и $h = 1,3$ мм использование пружинящего резца взамен стандартного хотя и позволило частично погасить автоколебания, но на обработанной поверхности все еще оставались следы вибраций. Обработка же стандартным резцом при этих условиях оказалась вообще невозможна из-за возникновения сильных вибраций. При $h = 1,5$ мм произошло практически полное гашение автоколебаний заготовки как в вертикальном, так и горизонтальном направлениях (рис. 6), а обработанная поверхность приобрела зеркальный блеск (рис. 5 в). При этом колебания головки пружинящего резца также прекратились.

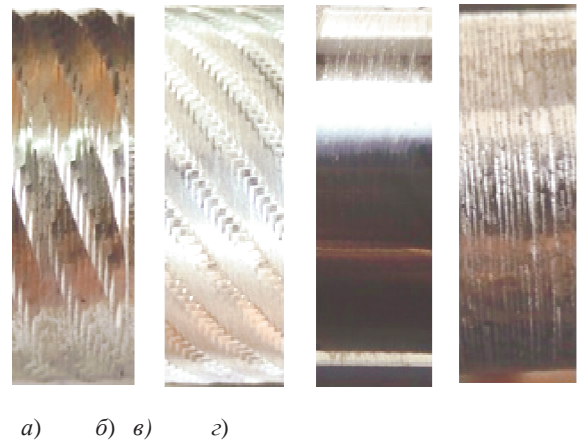


Рис. 5. Поверхности, полученные точением пружинящим резцом с поднятием его вершины выше оси центров: а) — $h = 0,7$ мм; б) — $h = 1,3$ мм; в) — $h = 1,5$ мм; з) — $h = 1,7$ мм при $t = 0,25$ мм; $S_o = 0,285$ мм/об; $n = 1250$ об/мин

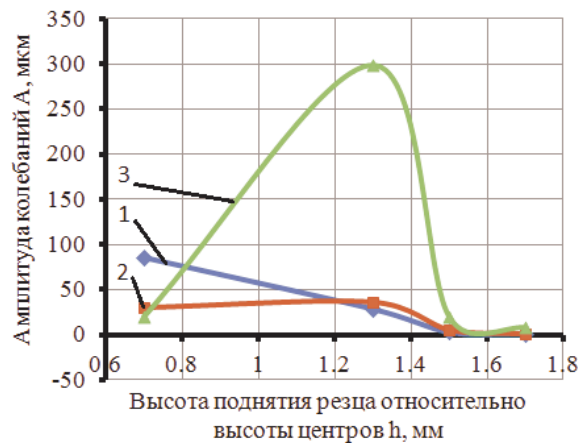


Рис. 6. Влияние высоты поднятия вершины пружинящего резца выше оси центров на амплитуду автоколебаний: 1 — вертикальных; 2 — горизонтальных; 3 — колебаний резца

Поднятие вершины резца выше оси центров станка на высоту h уменьшает фактический задний угол переходного лезвия на величину:

$$\Delta\alpha = \arcsin\left(\frac{2h}{d}\right).$$

При $h = 1,5$ мм $\Delta\alpha$ составило $7,5^\circ$, а фактический задний угол — $0,5^\circ$. Достигнутый результат объясняется тем, что одновременно со срезанием припуска происходило выглаживание обработанной поверхности задней поверхностью переходного лезвия и подавление автоколебаний за счет трения задних граней резца о заготовку. Механизм подавления автоколебаний путем рассеяния их энергии колебаниями дополнительного касательного контура сменился механизмом диссипации энергии автоколебаний в трущейся плоской кинематической паре [14]. Поднятие резца на $h = 1,7$ мм обеспечило $\Delta\alpha = 8,4^\circ$, а фактический задний угол стал отрицательным, величиной $0,4^\circ$. В этом случае лезвие резца не доставало обрабатываемую поверхность, и резец своей задней поверхностью терся о заготовку, не срезая припуска (рис. 5 з) и не возбуждая автоколебания. Из проведенных опытов наиболее приемлемой

следует считать высоту поднятия резца $h = 1,5$ мм, обеспечивающую хорошее качество обработанной поверхности.

Таким образом предложенный В.И. и Б.В. Леонтьевыми [4] способ подавления автоколебаний можно модернизировать путем назначения высоты поднятия вершины резца на величину, соответствующую фактическому заднему углу резца не 3° , а $0,5^\circ$, что обеспечит возможность срезания припуска и выглаживания обработанной поверхности при одновременном повышении динамической устойчивости нежесткой технологической системы. Однако практическому применению такого комбинированного способа чистовой токарной обработки нежестких валов, включающего резание и поверхностное пластическое деформирование, должно предшествовать исследование стойкости инструментального материала резца [11–12].

Для изучения возможности повышения производительности обработки провели четвертую серию опытов также пружинящим резцом, снабженным переходным лезвием длиной 0,5 мм и поднятым на 1,5 мм, с частотой вращения шпинделя $n = 1250$ об/мин ($v = 96$ м/мин) и изменением величины подачи от 0,285 до 0,475 мм/об. Влияние подачи на внешний вид обработанной поверхности и амплитуды колебаний заготовки и резца показано соответственно на рис. 7 и 8.

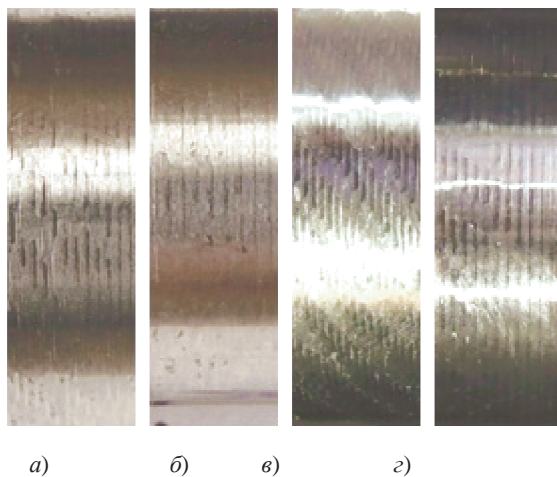


Рис. 7. Поверхность, полученная при изменении величины подачи: а) — при $S = 0,285$ мм/об; б) — при $S = 0,335$ мм/об; в) — при $S = 0,375$ мм/об; з) — при $S = 0,47$ мм/об.

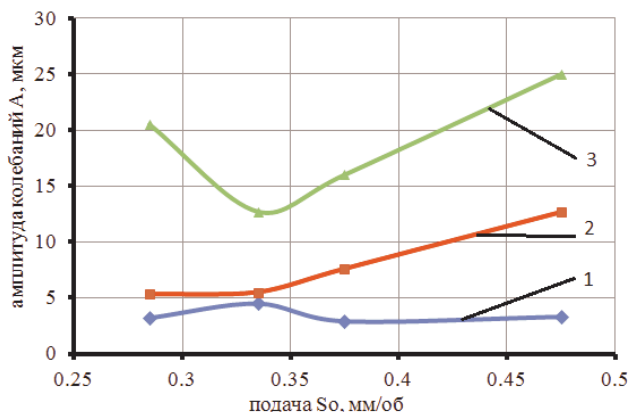


Рис. 8. Зависимость амплитуды автоколебаний от величины подачи: 1 — вертикальных; 2 — горизонтальных; 3 — резца

при $t = 0,25$ мм; $l_{\text{фаск.}} = 0,5$ мм; $h_{\text{поднят.}} = 1,5$ мм; $v_{\text{рез}} = 96$ м/мин

В опытах этой серии по сравнению с предыдущими опытами обработка проходила значительно спокойнее. Тем не менее, повышение подачи вело к росту силы резания и соответственно увеличению притока энергии в колеблющуюся технологическую систему. В горизонтальном направлении поэтому проявились четко выраженные автоколебания на второй гармонике. С увеличением подачи амплитуда вертикальных колебаний заготовки практически не изменяется в диапазоне 3...5 мкм, горизонтальных — возрастает от 5 до 13 мкм, а у резца сначала уменьшается с 20 до 12 мкм с дальнейшим повышением до 25 мкм. При подачах 0,285; 0,335 и 0,375 мм/об. шероховатость поверхности визуально практически не изменилась, а при подаче 0,475 мм/об. — ухудшилась, что можно объяснить ростом горизонтальных колебаний заготовки. Поэтому наиболее рациональной можно считать величину подачи, равную 0,375 мм/об., так как она является максимально возможной без ухудшения шероховатости обработанной поверхности.

Выводы

Проведенное исследование показало, что предложенная конструкция регулируемого пружинящего резца позволяет эффективно подавлять автоколебания при точении нежестких валов и может быть рекомендована для промышленного использования. В сочетании с приемом поднятия его вершины выше оси центров станка резец может обеспечить приемлемое качество обработанной поверхности без использования люнетов и дополнительных демпферов вибраций.

Литература

1. Эльясберг М.Е., Савинов И.А. Способ точения и устройство для осуществления способа точения: а.с. № 603501 СССР. № 2068833/25-08; заявл. 21.10.74; опубл. 25.04.78, Бюл. № 15. 10 с.
2. Расторгуев Д.А., Расторгуева О.А., Драчев О.И., Николаев С.В. Резец для вибрационного резания: пат. 2292990 Рос. Федерация. № 2004133783/02; аявл. 18.11.04; опубл. 10.02.07, Бюл. № 4. 7 с.
3. Драчев О.И., Расторгуев Д.А. Исследование динамики процесса резания методом вейвлет-анализа // Металлообработка. 2008. № 4. С. 2-6.
4. Леонтьев В.И., Леонтьев Б.В. Роль резца в автоколебаниях низкой частоты // Исследование и оптимизация процессов механической обработки при автоматизации технологического проектирования: межвуз. сб. Владивосток, 1976. № 7. С. 70-82.
5. Лобанов Д.В., Янюшкин А.С. Влияние методов затачивания на качество твердосплавного инструмента для обработки композиционных материалов // Вестник машиностроения. 2011. № 3. С. 50-53.
6. Lobanov D.V., Yanyushkin A.S. Influence of sharpening on the quality of hard-alloy tools for the cutting of composite // Russian Engineering Research. 2011. № 3. P. 236-239.
7. Янюшкин А.С. Технология комбинированного электроалмазного затачивания твердосплавных инструментов: моногр. М.: Машиностроение, 2003. 242 с.

8. Янюшкин А.С., Якимов С.А., Лобанов Д.В. Состояние твердотельного инструмента, заточенного различными методами электроалмазной обработки // Вестн. Иркут. регион. отд-я acad. наук выс. шк. Рос. Федерации. 2006. № 2. С. 100-104.

9. Lobanov D.V., Yanyushkin A.S., Rychkov D.A., Petrov N.P. Optimal organization of tools for machining composites // Russian Engineering Research. 2011. № 2. P. 156-157.

10. Mikhalev O.N., Yanyushkin A.S. Perfection of the automated systems of machine-building manufactures // Journal of International Scientific Publications: Materials, Methods & Technology. 2010. № 3. P. 15-27.

11. Yanyushkin A.S., Lobanov D.V., Rychkov D.A. Automation Tool Preparation in the Conditions of Production // Applied mechanics and materials. 2015. № 770. P. 739-743.

12. Merritt H.E. Theory of Self-Excited Machine Tool Chatter // ASME J. Eng. Indus. 1965. № 87. P. 447 – 454.

13. Ota H., Kono K. On Chatter Vibrations of Machine Tool or Work Due to Regenerative Effect and Time Lag // ASME J. Eng. Indus. 1974. Vol. 96. № 4. P. 1337-1346.

14. Vogler V.P., De Vor R.E., Kapoor S.G. Nonlinear Influence of Effective Lead Angle in Turning Process Stability // ASME J. Manuf. Sci. Eng. 2002. № 124. P. 473-475.

References

1. El'yasberg M.E., Savinov I.A. A method of turning and apparatus for performing the process of turning: a.s. № 603501 SSSR. № 2068833/25-08; zayavl. 21.10.74; opubl. 25.04.78, Byul. № 15. 10 p.

2. Rastorguev D.A., Rastorgueva O.A., Drachev O.I., Nikolaev S.V. Cutter for cutting vibration: pat. 2292990 Ros. Federatsiya. № 2004133783/02; zayavl. 18.11.04; opubl. 10.02.07, Byul. № 4. 7 p.

3. Drachev O.I., Rastorguev D.A. Study of the dynamics of the process of cutting by wavelet analysis // Metalloobrabotka. 2008. № 4. P. 2-6.

4. Leont'ev V.I., Leont'ev B.V. The role of the tool in the self-oscillations of low frequency // Issledovanie i optimizatsiya protsessov mekhanicheskoi obrabotki pri avtomatizatsii tekhnologicheskogo proektirovaniya: mezhvuz. sb. Vladivostok, 1976. № 7. P. 70-82.

5. Lobanov D.V., Yanyushkin A.S. Influence of methods of sharpening the quality carbide tools for machining of composite materials // Russian Engineering Research. 2011. № 3. P. 50-53.

6. Lobanov D.V., Yanyushkin A.S. Influence of sharpening on the quality of hard-alloy tools for the cutting of composite // Russian Engineering Research. 2011. № 3. P. 236-239.

7. Yanyushkin A.S. Technology combined electro diamond sharpening carbide tools: monogr. M.: Mashinostroenie, 2003. 242 p.

8. Yanyushkin A.S., Yakimov S.A., Lobanov D.V. Condition solid tools sharpened by various methods of electric diamond processing // Vestn. Irkut. region. otd-ya acad. nauk vys. shk. Ros. Federatsii. 2006. № 2. P. 100-104.

9. Lobanov D.V., Yanyushkin A.S., Rychkov D.A., Petrov N.P. Optimal organization of tools for machining composites // Russian Engineering Research. 2011. № 2. P. 156-157.

10. Mikhalev O.N., Yanyushkin A.S. Perfection of the automated systems of machine-building manufactures // Journal of International Scientific Publications: Materials, Methods & Technology. 2010. № 3. P. 15-27.

11. Yanyushkin A.S., Lobanov D.V., Rychkov D.A. Automation Tool Preparation in the Conditions of Production // Applied mechanics and materials. 2015. № 770. P. 739-743.

12. Merritt H.E. Theory of Self-Excited Machine Tool Chatter // ASME J. Eng. Indus. 1965. № 87. P. 447-454.

13. Ota H., Kono K. On Chatter Vibrations of Machine Tool or Work Due to Regenerative Effect and Time Lag // ASME J. Eng. Indus. 1974. Vol. 96. № 4. P. 1337-1346.

14. Vogler V.P., De Vor R.E., Kapoor S.G. Nonlinear Influence of Effective Lead Angle in Turning Process Stability // ASME J. Manuf. Sci. Eng. 2002. № 124. P. 473-475.