

УДК 621.9.025:534.1

Ю. П. Ракунов, к.т.н., доц., В. В. Абрамов, д.т.н., проф., А. Ю. Ракунов, инженер.
НИУ Московский государственный строительный университет, Россия
Тел.: +7 (916) 810-71-26; E-mail: Rakunov1991@mail.ru

МЕТОДИКА УПРАВЛЕНИЯ РЕЖИМАМИ ОПТИМАЛЬНОГО РЕЗАНИЯ И ИНТЕНСИВНОСТЬЮ АВТОКОЛЕБАНИЙ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ СИСТЕМ

В статье рассматривается физическая модель возникновения и развития установившегося уровня автоколебаний при резании металлов унифицированным инструментом, в которой потеря устойчивости состояния упругой технологической системы резания с постоянной скоростью происходит в результате тепловыделения в зоне резания из-за зависимости механических характеристик обрабатываемого и инструментального материалов от температуры. Показана ошибочность мнения, что наибольшее влияние на уровень интенсивности автоколебаний оказывает сдвиг по фазе между изменением толщины среза и изменением силы резания. Утверждается, что при оптимальной скорости резания, соответствующей оптимальной температуре в зоне резания, достигаются надёжные условия с точки зрения отсутствия автоколебаний или достижения их оптимального уровня. Самый мощный и мобильный фактор - скорость резания. Зависимость амплитуды колебаний от скорости резания имеет ярко выраженный экстремальный характер. Рассмотрена блок-схема методики нахождения режимов оптимального резания и управления интенсивностью автоколебаний процесса через усадку стружки при точении на станках с ЧПУ.

Ключевые слова: физическая модель, оптимальная скорость резания, унифицированный режущий инструмент, режимы оптимального резания, блок-схема, алгоритм управления, оптимальные амплитуды колебаний.

Y. P. Rakunov, V. V. Abramov, A.Y. Rakunov

CONTROL METHOD FOR THE OPTIMAL CUTTING MODES AND THE INTENSITY OF AUTO-OSCILLATIONS OF TECHNOLOGICAL SYSTEMS

The article considers a physical model of the emergence and development of a steady level of self-oscillations when cutting metals with a unified tool, in which the loss of stability of the state of an elastic technological cutting system at a constant speed occurs as a result of heat release in the cutting zone due to the dependence of the mechanical characteristics of the processed and tool materials on temperature. The erroneous opinion is shown that the phase shift between the change in the thickness of the cut and the change in the cutting force has the greatest influence on the level of intensity of self-oscillations. It is stated that at the optimal cutting speed corresponding to the optimal temperature in the cutting zone, optimal conditions are achieved in terms of the absence of self-oscillations or the achievement of their optimal level. The most powerful and mobile factor is cutting speed. The dependence of the oscillation amplitude on the cutting speed has a pronounced extreme character. The block diagram of the technique for finding optimal cutting modes and controlling the intensity of self-oscillations of the process through chip shrinkage during turning on CNC machines is considered.

Keywords: physical model, optimal cutting speed, unified cutting tool, optimal cutting modes, block diagram, control algorithm, optimal oscillation amplitudes.

1. Введение

Повышение эксплуатационных свойств металлорежущих станков, их производительности и качества обработанной поверхности лезвийным унифицированным режущим инструментом (ЛУРИ) в значительной степени определяется динамическими процессами и, в частности, автоколебаниями, возникающими при резании. Сложность и неоднозначность физических процессов, происходящих при резании металлов, позволяет предположить, что возникновение и поддержание автоколебаний определяется рядом физических явлений, которые могут действовать одновременно. В зависимости от конкретных условий и состояния упругой системы станка и ЛУРИ некоторые из них могут доминировать. Среди этих условий, прежде всего, следует выделить жёсткость и демпфирующую способность элементов технологической системы, режимы оптималь-

ного резания (РОР), вид обработки, типоразмер ЛУРИ и обрабатываемой поверхности, а также физико-механические свойства обрабатываемого материала (ОМ), особенно, труднообрабатываемого ОМ (ТОМ) [1-4].

2. Основное содержание и результаты работы

Выполнение серии специальных опытов по исследованию процесса резания, определению роли «следа» в развитии автоколебаний, по нахождению зависимости P_y/P_z ($Pr/P\varphi$) от толщины среза a и радиуса округления режущей кромки ρ , исследованию зависимости $P_{z,x,y} = f(V)$ при непрерывном изменении скорости V во время опыта и другие специальные исследования позволяют понять **физическую сущность** возникновения и развития установившегося уровня автоколебаний технологических систем, в том числе, упругой системы ЗИПС (заготовка – инструмент – приспособление - станок) [5-9]. **Физическая модель** возникновения и развития установившегося уровня и формы автоколебаний при резании ЛУРИ может быть представлена следующей схемой:

1) любые случайные или закономерные толчки (врезание зуба фрезы в заготовку), первичное врезание резца, срыв нароста, неравномерность припуска (толщины среза), непостоянство жёсткости, флуктуации диссипативных сил, колебания привода станка, колебания, передаваемые от соседних работающих станков и т.д.) выводит из динамического равновесия упругую систему ЗИПС и приводит к изменению площади среза: txS

2) наблюдаемое физическое временное отставание τ изменения силы резания P_z от изменения толщины среза a , корреляционно связанное с коэффициентом усадки стружки K_a , генерирует возникающие собственные затухающие колебания в незатухающие автоколебания, где энергию, поддерживающую их, создаёт изменяющаяся синхронно, но сдвинутая по фазе P_z ;

3) возникшие при этом на поверхности резания вибрационные следы, начиная со второго оборота заготовки при точении или с работы второго зуба при резании фрезой, будут за каждое колебание передавать дополнительную порцию энергии в систему и усиливать колебания. Однако при этом будут расти и силы сопротивления (диссипации-демпфирования);

4) через какое-то время переходного процесса наступит равновесие между энергией возбуждения, поступающей в систему, и энергией, рассеиваемой при колебаниях, - **установится определённый уровень автоколебаний**. Установившийся уровень автоколебаний не остаётся строго постоянным, а периодически изменяется притоком энергии от случайных толчков и дополнительным демпфированием колебаний [6,10].

Автоколебания, как правило, происходят с периодически меняющейся амплитудой A и имеют форму **биений**. Появление биений, вероятно, связано с тем, что частота автоколебаний, как правило, несколько отличается (обычно в сторону увеличения) от частоты собственных колебаний доминирующей колебательной системы ЗИПС [10-13].

Такие физические явления, как образование элементов стружки, её усадка, неустойчивое и устойчивое наростообразование при работе на реальных режимах резания твёрдосплавными и быстрорежущими ЛУРИ [3,5,7], оказывает решающее влияние на процесс автоколебаний. Именно срывы нароста на прирезцовую сторону стружки происходят через $(1,5 \div 2,2)$ мс (450–660 раз в секунду) при $V = 10 \dots 35$ м/мин (ОМ – углеродистые стали) и являются первичным толчком, выводящим из равновесия автоколебательную технологическую систему, приводя к возбуждению автоколебаний. В этом диапазоне V наблюдаются наибольшие значения коэффициента усадки стружки K_a и, следовательно, связанной с ним фазовой характеристики силы резания $\tau = -1 + 2,6 K_a$.

(рис. 2), т. е. величины отставания изменения силы резания от изменения толщины среза a [12,13]. Снижение величины τ от $0,25T_K$ до $0,1T_K$ [13,рис. 3.15,3.16] приводит к снижению A в 3...4 раза. [7, 13,14]. Уровень интенсивности автоколебаний упругих технологических систем существенно влияет на стойкость ЛУРИ, производительность обработки и качество обработанной поверхности изделий (волнистость, шероховатость, наклеп, остаточные напряжения). Для каждого технологического перехода существует оптимальный уровень колебаний, при котором наблюдается максимальная стойкость ЛУРИ и высокое качество обработанной поверхности. За счет управления уровнем интенсивности автоколебаний можно добиться 5...10-ти кратного увеличения стойкости ЛУРИ, 2...5-ти кратного повышения производительности и существенного улучшения эксплуатационных характеристик качества обработанной поверхности ТОМ [14-16].

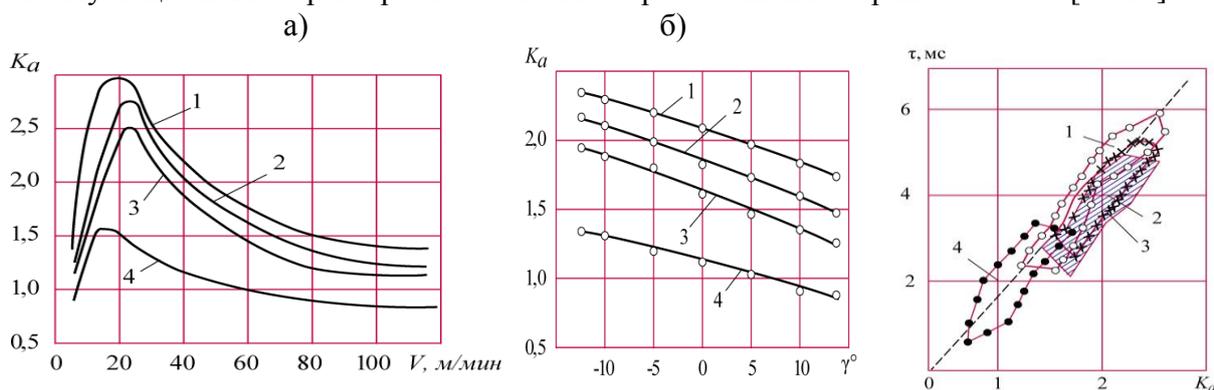


Рисунок 1. Зависимость усадки стружки от: а - V ; б - угла γ ($V = 40$ м/мин) при свободном течении ($a=0,5$; $b=4$; $\gamma=0^\circ$; $\alpha=12^\circ$): 1-сталь 08X15H5Д2Т; 2 - 12X18H9Т; 3 - сталь 45; 4 - титановый сплав ВТ9

Рисунок 2. Зависимость $\tau = f(K_a)$, условия те же, что на рис. 1.

Для ряда технологических деталей-операций (точения, растачивая, фрезерования цилиндрическими, дисковыми, концевыми и торцовыми фрезами, нарезания резьбы и других операций) оптимальный уровень интенсивности автоколебаний уже установлен нашими исследованиями применительно к ЛУРИ, оснащенным твердым сплавом, при обработке ТОМ (коррозионно-стойких, жаропрочных и титановых конструкционных материалов) [5,15].

На основании выполненных теоретических и экспериментальных исследований все параметры упругой технологической системы, режима резания (РР), геометрии и конструкции ЛУРИ удалось ранжировать - (расположить в определенной последовательности) по степени их влияния на интенсивность автоколебаний [5,7,15,16]. Ошибочно считают, что наибольшее влияние на уровень интенсивности автоколебаний оказывает сдвиг по фазе (отставание) τ между изменением толщины среза и изменением силы резания. Таким образом, нарушается причинно-следственная связь физических явлений. Кривые, выражающие зависимость $A = f(\tau)$, имеют резко выраженный экстремальный характер [13, рис. 3.15,3.16]. Считают, очевидно, что наибольшая интенсивность колебаний наблюдается при $\tau = 0,25T_K$; для всех процессов резания как уменьшение, так и увеличение значения τ приводят к резкому снижению A [8-10,13].

Наиболее влияют на A обобщенный коэффициент сопротивления (демпфирования) η_0 и коэффициент суммарной жесткости C доминирующей колебательной системы. Кривые, выражающие зависимости $A = f(\eta_0)$ и $A = f(C)$, имеют форму гипербол (рис. 3,4). Первая из этих зависимостей выражена более резко.

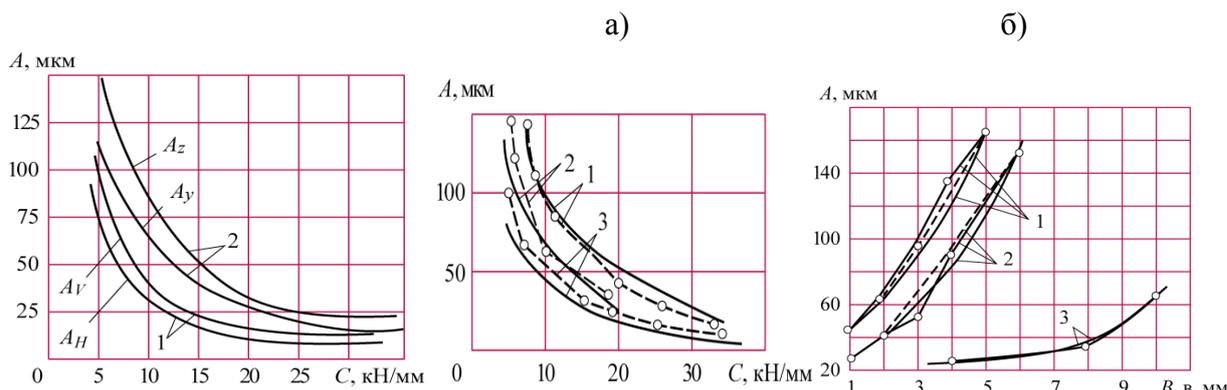


Рисунок 3. Зависимость $A = f(C)$ доминирующей колебательной системы 1- фрезерование концевой фрезой ВТ20; 2- свободное точение стали Х15Н5Д2Т резцом унифицированным наружным канавочным (РУНК) с РЭ из т/с ВК6М

Рисунок 4. Сопоставление зависимостей: а) - $A = f(C)$; б) - $A = f(B, b)$ при обработке: а) 1- дисковой фрезой ВК8 ($D = 70$ мм, $z = 16$, $B = t = 3$ мм, $S_z = 0,07$ мм/зуб, $\eta_0 = 3$ кН/мм), сплав ОТ4; 2- свободное точение стали Х15Н5Д2Т резцами ВК8 ($\gamma = 10^\circ$; $\alpha = 12^\circ$, $a = 0,4$; $b = 2$ мм, $\eta_0 = 3$ кН/мм); 3- концевой фрезой ВК8 ($D = 40$ мм, $z = 5$, $V = 120$ м/мин, $S_z = 0,056$; $t = 1$, $B = 14$, $\eta_0 = 3,3$), сплав ВТ20. б) 1-дисковое фрезерование ВК8-ОТ4; 2 - свободное точение ВК8-Х15Н5Д2Т; 3-концевое фрезерование ВК8-ВТ9.

- - - экспериментальные данные, — теоретические, - - - многофакторный эксперимент.

Многие исследователи считают, что несколько меньшее влияние на A оказывают параметры РР и геометрии ЛУРИ. Из этих параметров наибольшее влияние на интенсивность автоколебаний оказывает ширина среза a (рис. 4б). Эта зависимость почти прямо пропорциональна. Однако, **самый мощный и мобильный фактор - скорость резания V** . Зависимость $A = f(V)$ имеет ярко выраженный экстремальный характер (рис. 5а). Это связано с изменением усадки стружки и соответствующим изменением значения отставания τ при изменении V . Скорость резания влияет на интенсивность автоколебаний через изменение усадки стружки K_a и соответствующее изменение значения τ .

Толщина среза (или подачи S) слабо влияет на интенсивность автоколебаний при равномерных процессах резания и существенно — при прерывистых процессах (рис. 5б) [12,13]. Увеличение переднего угла γ ЛУРИ всегда приводит к снижению составляющих силы резания и соответствующему уменьшению A (рис. 1б и 5в). Все остальные факторы существенно слабее влияют на интенсивность автоколебаний и, очевидно, могут не учитываться при разработке методик управления интенсивностью автоколебаний.

Большинство из перечисленных факторов, которые существенно влияют на амплитуду автоколебаний A , находятся в тесной взаимосвязи, поэтому методика управления интенсивностью автоколебаний должна предусматривать несколько этапов. Общая структурная схема методики управления интенсивностью автоколебаний применительно к процессу точения показана на рис. 6. Методики управления интенсивностью автоколебаний для других процессов резания не имеют принципиальных отличий [12,13].

На первом этапе назначается максимальное сечение среза $F_{max} = t_{max} \cdot S_{нтд}$ из условия обработки в один черновой проход (t_{max}) и применения наибольшей технологически

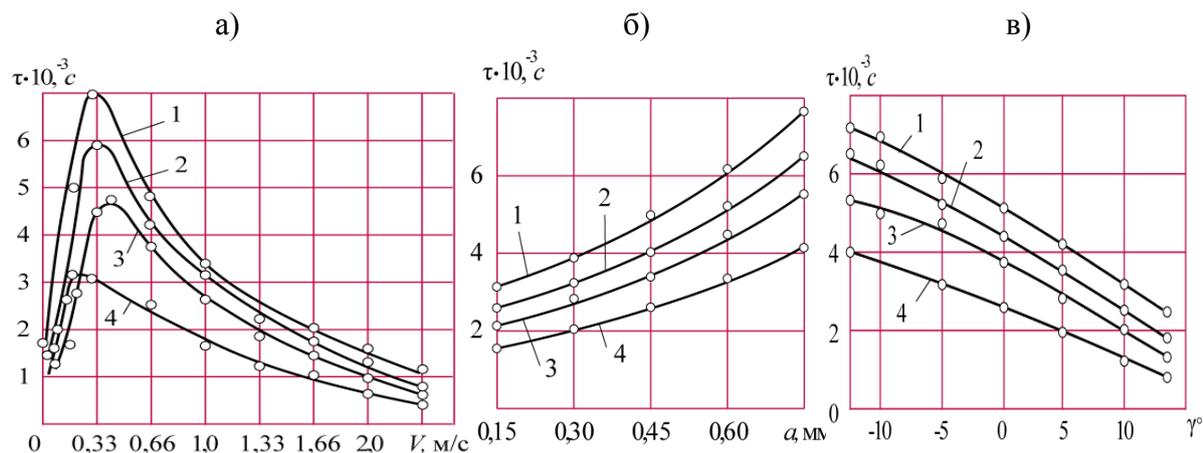


Рисунок 5. Зависимость фазовой характеристики силы резания τ от: а) – скорости резания V ; б) - толщины среза a ; в) – от величины переднего угла γ .

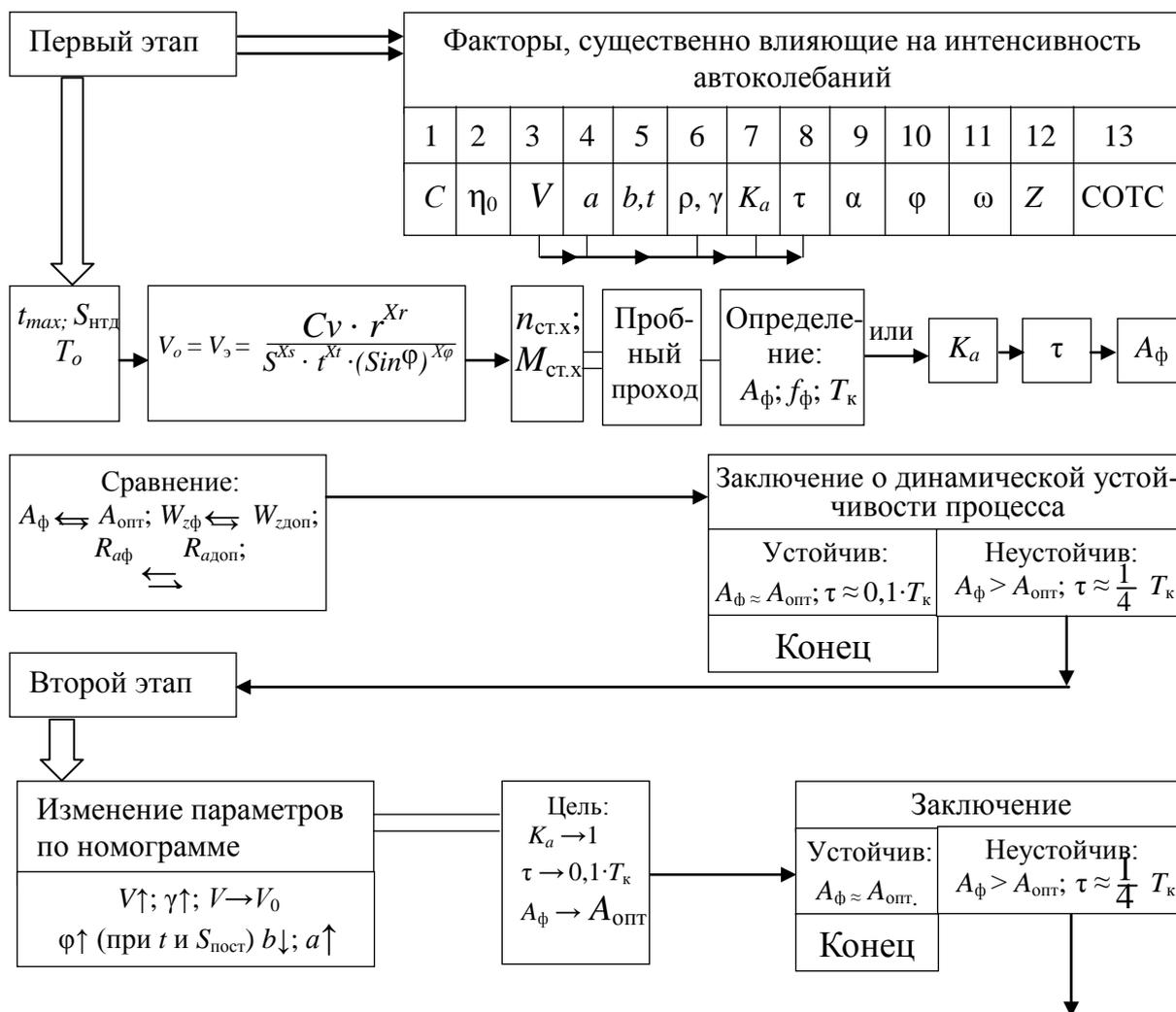




Рисунок 6. Блок-схема методики нахождения режимов оптимального резания и управления интенсивностью автоколебаний процесса точения на станках с ЧПУ.

допустимой подачи $S_{нтд}$. Эта $S_{нтд}$ назначается для черновых и получистовых проходов по номограммам или рассчитывается из следующих условий: 1) по шероховатости поверхности и по жесткости изделия; 2) по жесткости и прочности инструмента; 3) по прочности механизма подачи станка. Наименьшая S из этих условий, сверенная с паспортом станка, – подача $S_{нтд}$. После выбора t_{max} , $S_{нтд}$ устанавливают по номограммам [7,16] для данных инструментального (ИМ) и обрабатываемого (ТОМ) материалов, оптимальную скорость резания, которую также можно определить по известной формуле

$$V_o = V_э = C_v \cdot t^{X_r} / S^{X_s} \cdot t^{X_t} \cdot (\sin \varphi)^{X_\varphi} \quad (1)$$

По установленной оптимальной скорости резания определяют необходимую частоту вращения шпинделя $n_o = 1000V_o / \pi D$ и сверяют с имеющимся на станке $n_x \leq n_o \leq n_{x+1}$. Выбранный режим резания (n_x или n_{x+1} ; t_{max} ; $S_{нтд}$) проверяют по моменту станка на данной ступени $M_{рез} \leq M_{СТx}$ или $M_{СТx+1}$. Если это условие не соблюдается, то приходится снижать n или использовать более мощный станок на данного установка (деталеоперации).

Рассчитанный таким образом или выбранный по номограммам **наивыгоднейший режим оптимального резания (POP)** проверяется на динамическую устойчивость. Для этого на режиме n_x (или n_{x+1}), t_{max} , $S_{нтд}$ осуществляется пробный проход при соблюдении всех условий, при которых будет производиться дальнейшая обработка. Во время этого пробного прохода с помощью бесконтактного датчика ПЭП или другого виброизмерительного прибора измеряют амплитуду A и частоту колебаний f доминирующей колебательной системы ЗИПС.

Если на предприятии нет технологической лаборатории (или лаборатории резания), оснащенной виброизмерительной аппаратурой, то во время пробного прохода следует собрать стружку и по ней определить коэффициент поперечной усадки $K_a = a_{стр} / a$, где $a_{стр}$ – толщина стружки; a – толщина среза; $a = S \sin \varphi$.

По коэффициенту поперечной усадки K_a с помощью графика (рис. 2) или формулы: $\tau = -1 + 2,6 K_a$ определяют значение фазовой характеристики силы резания τ (мс).

Кроме того, по следу на поверхности резания находят частоту f и период автоколебаний T_K . Для этого нужно во время резания примерно в середине прохода быстро отвести резец с тем, чтобы во время отвода он не успел срезать следы вибраций на всей окружности поверхности резания. Если след четкий, то индикатором, закрепленным в резцедержателе, при провороте шпинделя вручную удастся приблизительно замерить и размах колебаний $2A$. Затем значение τ (мс) переводят в доли периода автоколебаний T_K и по графику [13, рис. 3.16 или 3.17] определяют приблизительно амплитуду автоколебаний A . Если она близка к значению A , измеренному по следу на поверхности реза-

ния, и расхождение составляет не более 30%, то такой результат следует признать хорошим и можно считать, что во время обработки амплитуда автоколебаний будет близка к полученной величине.

Однако графики на [13, рис. 3.16 и 3.17] получены для вполне определенных условий расчета (C , η_0 , C , m и т. д.). Они в общем случае не будут совпадать с условиями, для которых хотим определить амплитуду колебаний, поэтому конкретных значений A можно и не получить. В этом случае следует ограничиться определением значения τ в долях периода автоколебаний T_K . Далее следует полученное приближенное значение амплитуды или, лучше, измеренное с помощью виброизмерительной аппаратуры значение A сопоставить с кривыми на [13, рис. 2.2] и определить, как далека амплитуда колебаний от оптимального (по критерию стойкости) ее значения. Если амплитуда близка к оптимальной ($A_{\text{опт}} = 8 \div 20$ мкм) или отличается от неё не более чем на 5 мкм, то данный технологический переход необходимо считать динамически устойчивым. Отсюда следует, что фактическая стойкость ЛУРИ не должна заметно отличаться от максимально достижимого значения стойкости T_0 . Характеристики качества поверхности (волнистость, шероховатость, наклеп, остаточные напряжения в поверхностном слое) будут также близки к наилучшим при данном виде обработки. При этом следует иметь в виду, что все приведенные конкретные значения параметров относятся к всем видам обработки твердосплавным и быстрорежущим ЛУРИ и распространяются на тонкое точение и другие прецизионные методы обработки, в том числе, сверхтвердыми синтетическими материалами (СТМ). **Для этих процессов оптимальные (по критерию стойкости) амплитуды колебаний имеют значения: $A_{\text{опт прец}} = 3 \div 7$ мкм (финишная, прецизионная); $A_{\text{опт чист}} = 8 \div 12$ (чистовая); $A_{\text{опт н/ч}} = 12 \div 18$ (получистовая); $A_{\text{опт черн}} = 18 \div 30$ мкм (черновая).**

Итак, если фактическая амплитуда автоколебаний близка или совпадает с $A_{\text{опт}}$, то данный технологический переход (проход) является динамически устойчивым и не нуждается в дальнейшей оптимизации, однако такое счастливое или удачное совпадение наблюдается достаточно редко. В тех случаях, когда не удастся определить фактическую амплитуду автоколебаний, можно сделать приблизительное заключение о динамической устойчивости, если $\tau \leq 0,1T_K$, и наоборот, если величина τ близка к $0,25T_K$, то следует считать, что процесс, вероятно, неустойчив и нуждается в дальнейшей оптимизации [17-19].

На втором этапе (см. рис. 6) управления интенсивностью автоколебаний делается попытка приблизить фактическую амплитуду автоколебаний к оптимальному ее значению $A_{\text{опт}}$ без снижения минутной производительности обработки и без применения специальных устройств, увеличивающих жесткость и демпфирующую способность системы. Это достигается путем рационального изменения значения τ за счет варьирования усадкой (K_a). Увеличение τ до $\tau = 0,5T_K$ является трудным и неверным путем, так как это возможно только при очень больших значениях K_a . Нужно идти в обратном направлении и всегда стремиться уменьшить значение τ за счет уменьшения значения K_a . Последнее возможно сделать за счет увеличения переднего угла γ и применения оптимальных СОЖ. Кроме того, снижение значения τ и амплитуды колебаний A может быть достигнуто одновременным уменьшением ширины среза b и увеличением толщины среза a при неизменной глубине резания t и подаче S , т. е. путем увеличения угла в плане ϕ до $90 \dots 100^\circ$. Однако повышение скорости резания V , увеличение переднего угла γ и угла в плане ϕ обычно ведет к снижению стойкости ЛУРИ, поэтому выполнять эти изменения целесообразно с помощью специально разработанных для данного процесса и труднообрабатываемого материала (ТОМ) номограмм, чтобы заранее предвидеть допустимые границы изменения этих параметров [13,16]. Кроме того, с помощью

номограмм выбор значений перечисленных параметров производится быстро, без излишних затрат времени. Таким путем удастся в ряде случаев приблизить фактическую амплитуду автоколебаний к ее оптимальному значению и существенно повысить производительность обработки, стойкость ЛУРИ и качество обработанной поверхности [17,18].

Если изменением перечисленных параметров не удастся снизить амплитуду автоколебаний до требуемого значения, приходится переходить к третьему этапу. **На третьем этапе** (см. рис. 6) управление интенсивностью автоколебаний осуществляется за счет изменения обобщенного коэффициента сопротивления η_0 , или за счет изменения жёсткости C , или одновременно и того и другого. Увеличение жёсткости и виброустойчивости системы ЗИПС всегда повышает качество и производительность обработки. Так, например, повышение жёсткости расточного резца от $j = 410$ Н/мм до критической $j_k = 940$ Н/мм оптимальная скорость резания V_O возрастает, а относительный поверхностный износ $h_{\text{опо}}$ снижается. *Дальнейшее повышение жёсткости на V_O и величину $h_{\text{опо}}$ практически не влияет.* Однако, при повышении жёсткости расточного резца размерная точность обработки повышается вследствие уменьшения упругих отжатиц резца [5,7,15]. Повышение интенсивности размерного износа и снижение V_O при использовании расточных ЛУРИ, жёсткость которых ниже критической, объясняется вибрациями резца выше $A_{\text{опт}}$. При растачивании отверстий унифицированными резцами жёсткостью $j = 1350$ Н/мм и более во всем диапазоне V наблюдается «спокойное» резание без видимых следов вибраций. Резание было «спокойное» и при работе расточным резцом с $j_k = 940$ Н/мм и $V_O = 93$ м/мин, а также с $V = 27$ м/мин расточными резцами любой жёсткости в исследованных пределах (растачивание отверстий $d = 20 \dots 24$ мм в стали 12X18H9T при $t = 0,3$ мм, $S = 0,06$ мм/об). Во всех остальных случаях на обработанной поверхности наблюдались следы вибраций. Так как изменение жёсткости j расточного резца на среднюю температуру контакта, измеренную методом естественной термопары, заметного влияния не оказывает, то уменьшение V_O и повышение $h_{\text{опо}}$ при снижении жёсткости расточного резца ниже критической j_k следует отнести только за счёт изменения интенсивности (амплитуды A) и частоты колебаний режущей кромки резца. Применение этих методов повышения j обычно требует определенного времени на подготовку производства и материальных затрат. Однако экономический выигрыш от оптимизации уровня интенсивности автоколебаний за счет повышения производительности обработки, стойкости ЛУРИ и улучшения качества изделий всегда во много раз и быстро окупает затраты, связанные с применением более прогрессивных и виброустойчивых инструментов и оснастки.

Выводы и рекомендации.

Для повышения динамической устойчивости операций механической обработки в настоящее время разработано и находится в стадии разработки и исследования большое число прогрессивных ЛУРИ, специальных устройств и оснастки. Применение таких инструментов, устройств и оснастки с повышенными коэффициентами η_0 и C позволяет практически всегда изменить A в нужного направлении и приблизить ее вплотную к оптимальному значению $A_{\text{опт}}$, т. е. успешно завершить процесс управления интенсивностью автоколебаний и существенно повысить производительность, стойкость ЛУРИ и качество обработанной поверхности изделий. Важность проблемы повышения динамической устойчивости процессов механической обработки существенно возросла в связи с широким применением многооперационных станков с ЧПУ и магазинами инструментов, особенно с развитием гибких автоматических производств (ГАП). Это объясняется тем, что в таких производствах отсутствие динамической устойчивости даже на одном переходе ведет к нестабильной работе участка станков с ЧПУ или всего

цеха современного завода и увеличению простоев высокопроизводительного дорогостоящего оборудования наукоёмких производств.

ЛИТЕРАТУРА:

1. Дроздов, Н. А. К вопросу о вибрациях станка при токарной обработке / Н. А. Дроздов / Станки и инструмент. – 1937. – № 12. – С. 5–9.
2. Каширин, А. И. Исследование вибраций при резании металлов. – М.: АН СССР, 1944 – 282 с.
3. Патент РФ №2226453 Многократно перетачиваемый резец / Ракунов Ю. П., Хрульков В. А., Золотова Н. А., Тихонов Н. А. – Бюл. № 10, 2004.
4. Эльясберг, М. Е. Об устойчивости процесса резания / М. Е. Эльясберг // Изв. АН СССР. ОТН, 1958. – № 9.
5. Ракунов, Ю. П. Управление качеством токарной обработки высокоточных деталей машин. / Ю. П. Ракунов // Наукоёмкие технологии в машиностроении. – № 2. – 2013. – С. 36-48.
6. Эльясберг, М. Е. Автоколебания металлорежущих станков: Теория и практика / М. Е. Эльясберг. – СПб.: ОКБ станкостроения, 1993. – 180 с.
7. Макаров, А. Д. Оптимизация процессов резания. – М: Машиностроение, 1976. – 278 с.
8. Бурмистров, Е. В. Фазовая характеристика силы резания и её роль в возникновении и развитии автоколебаний при точении нежестких деталей двигателей летательных аппаратов / Бурмистров Е. В. и др. // Вестник СГАУ. – 2008. – №3. – С. 36-43.
9. Зверев, Н. А. Виброустойчивость при растачивании отверстий в деталях из жаропрочных сталей / Зверев Н. А., Чжо У, Стебулянин М. М. // Вестник МГТУ «Станкин» – № 4(47). – 2018. – С. 30-36.
10. Авдонин, Г. Т. Исследование технологических особенностей чистового точения при наличии автоколебаний. дисс. к. т. н. - Куйбышев, 1983. -219 с.
11. Асташов, В. К. Термомеханическая модель возникновения автоколебаний при резании / Асташов В. К., Корендясев Г. К. // Проблемы машиностроения и надёжности машин. – 2012. – № 3. – С. 12-18.
12. Кудинов, В. А. Динамика станков. – М.: Машиностроение. 1967. – 360 с.
13. Жарков, И. Г. Вибрации при обработке лезвийным инструментом. – Л.: Машиностроение, 1987. – 184 с.
14. Грановский, Г. И. Резание металлов / Грановский Г. И., Грановский В. Г. – М.: Высшая школа, 1985. – 304 с.
15. Ракунов, Ю. П. Разработка САПР оптимальных групповых процессов токарной обработки на станках с ЧПУ / Ракунов Ю. П., Абрамов В. В. // Справочник. Инженерный журнал, приложение. – № 7. – 2015. – С. 1-29.
16. Ракунов Ю. П., Абрамов В. В., Ракунов А. Ю. Номограммы выбора подач и скоростей резания исходя из требуемой шероховатости обработки и износа унифицированных резцов. / Школа Науки – № 11(22), Сентябрь. – 2019. – С. 7-12.
17. Андреев, В. Н. Боровский Г.В., Боровский В.Г., Григорьев С.Н. Инструмент для высокопроизводительного и экологически чистого резания. Серия «Библиотека инструментальщика». – М.: Машиностроение, 2010. – 480 с.
18. Ракунов, Ю. П. и др. Роль скорости резания и радиуса округления режущего клина в эффективности тонкой механической обработки труднообрабатываемых материалов // Журнал «Станкоинструмент». – № 1, 2. – 2020. – С. 66.

Поступила в редколлегию 15.03.2022 г.