

ИССЛЕДОВАНИЕ ДИНАМИЧЕСКОЙ СИСТЕМЫ ТОКАРНОЙ ОБРАБОТКИ НЕЖЕСТКИХ ВАЛОВ

Драчов А.О. (ТГУ, Тольятти, РФ), **Расторгуев Д.А.** (ТГУ, Тольятти, РФ),
Тараненко Г.В. (СевНТУ, Севастополь, Украина),
Тараненко В.А. (ЛТУ, Люблин, Польша), **Свиць А.** (ЛТУ, Люблин, Польша)

Device for axis-stabilizing of low-rigid work pieces has been presented in the article. The method of calculation of dynamic parameters of the “work pieces-supports” subsystem is discussed. The influence on dynamic of work pieces by different variants of fixation is explored

ВВЕДЕНИЕ

Крепление при токарной обработке заготовок мало жестких валов обычно осуществляется в самоцентрирующем патроне с поджимом задним центром и использованием настраиваемого люнета. Из-за возможного несовпадения осей базирующих элементов технологической системы может происходить искривление оси заготовки при ее силовом замыкании в осевом направлении задним центром. При обработке резанием прогиб вала также увеличивается из-за тепловых и инерционных возмущений, действующих в технологической системе. Соответственно, задача стабилизации оси вала требует дальнейших исследований для ее решения. Высокие требования предъявляются к отклонениям формы и расположения базовых поверхностей под люнета, в этом случае требуется или выверка положения заготовки или предварительная проточка базовой шейки. Для уменьшения влияния неуравновешенности заготовки на процесс резания приходится снижать режимы обработки.

При обработке не жесткой заготовки необходимо снизить ее прогиб и сделать его равномерным по длине детали под действием сил резания, а также уменьшить неуровненность вращающейся заготовки, устранить влияние силового замыкания задним центром.

Формообразование поверхности при точении, растачивании определяется колебаниями элементов технологической системы. При этом регулярный макро- и микропрофиль поверхности зависит от полигармонических колебаний стохастической составляющей, которые являются функцией пространственных связей и жесткости элементов технологической системы. Если они стабильны и не изменяются в процессе обработки, профиль поверхности являются регулярным. Гармонические составляющие профиля детали задаются модами колебаний. Причем каждая из гармоник профиля (или их группа) зависит от отдельной составляющей колебаний, определяемой каким либо элементом технологической системы. При обработке мало жестких деталей доминирующее влияние на точность обработки оказывают смещения подсистемы заготовка-опоры.

Целью работы является повышение точности обработки, стабильности формы и геометрических размеров не жестких валов. Для достижения поставленной цели решались следующие **задачи**: разработка конструкции самоцентрирующего гидравлического люнета; проведение экспериментальных исследований конструкции люнета при различных видах обработки для стабилизации оси обрабатываемой детали; теоретическое обоснования использования различных комбинаций опор; проведение

анализа схем установки нежестких валов на токарной операции в стационарных люнетах, работающих в различных режимах.

КОНСТРУКЦИЯ САМОЦЕНТРИРУЮЩЕГО ГИДРАВЛИЧЕСКОГО ЛЮНЕТА

В процессе обработки нежестких деталей (НД) при точении, сверлении глубоких отверстий, вибрационном сверлении нашли широкое использование самоцентрирующие гидравлические люнеты (СЦЛ), которые позволяют стабилизировать ось НД в процессе обработки [1, 2, 3]. Конструкция СЦЛ приводится на рис. 1.

Люнеты расставляют по длине заготовки из условия равновесности в функции соотношений длин и диаметров детали ($l/d < 5$) или устанавливают люнеты в зонах пучностей распределения высших основных форм колебаний деталей. Самоцентрирующие гидролюнеты (СЦЛ) устанавливают в узлах изгибных колебаний, и работают как равновесные опоры. При этом давление, подводимое к СЦЛ, обеспечивает зажим детали, а на управляемых СЦЛ, устанавливаемых относительно необработанной на данном проходе поверхности и работающих в режиме демпфера, создают давление, обеспечивающее гашение (демпфирование) поперечных вибраций.

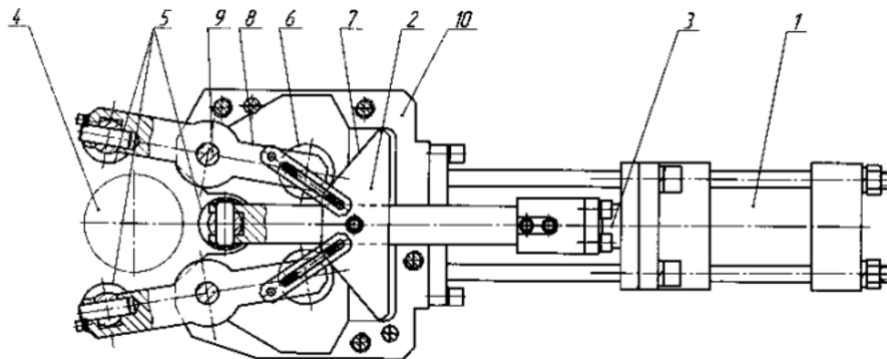


Рис. 1. Самоцентрирующийся люнет

Причем, по ходу передвижения сверла вдоль детали, переключение СЦЛ демпфирования, работающих в режиме демпферов, на режим равновесных опор (люнетов), производят с помощью коммутатора в функции пути, пройденного борштангой, регистрируемого датчиком. В исходном состоянии, перед процессом резания все гидролюнеты работают в режиме демпферов, кроме работающих в режиме равновесности, установленных у передней и задней бабок. Это условие выполняют с целью центрирования оси детали относительно технологической оси станка, а опорные поверхности детали в местах установки крайних люнетов предварительно протачивают. Традиционный способ крепления детали приводит к искривлению оси последней и возникновению остаточных напряжений в материале, которое усиливается под действием пластического деформирования во время обработки материала. Это позволяет базировать деталь по образующей поверхности детали, которая совпадает с измерительной базовой поверхностью, что приводит к увеличению точности обработки и исключению технологической наследственности от условий крепления.

Исполнительный механизм СЦЛ при резании работает следующим образом: при подаче рабочей среды (масло) в гидроцилиндр привода 1, плоский копир 2, соединенный со штоком-поршнем 3 привода, перемещается на обрабатываемую деталь 4, а рабочие ролики 5 (последние могут выполняться сдвоенными и имеют две степени свободы вращения: относительно собственной оси и оси поворота) зажимают или разжимают деталь посредством контакта роликов слежения 6 по рабочей поверхности 7

плоского копира. Рабочая поверхность копира выполнена по кривой, близкой к радиусу, и рассчитывается в зависимости от диапазона диаметров обрабатываемой детали. Одна пара рабочих роликов расположена на штоке плоского копира, две другие пары роликов закреплены на рычагах 8. Поворот рычагов, на концах которых расположены рабочие ролики 5, происходит относительно оси вращения 9. Последняя закреплена в корпусе 10 люнета. Зажим детали 4 осуществляется роликами по жесткой программе от копира. Силовое замыкание роликов происходит с усилием пропорциональным силе, развиваемой приводом. С целью разгрузки роликов и рычагов, а также повышения динамических характеристик технологической системы, продольная ось корпуса люнета, вместе с приводом повернута относительно горизонтальной плоскости на угол α , который рассчитывается в функции направления радиальной составляющей силы резания, зависящего от геометрических параметров используемых режущих инструментов: резцов расточной оправки, резцов для наружной обточки, сверл. Экспериментальное изучение поведения оси нежестких валов в процессе точения проводилось на лабораторной установке, станок 1A616, длина заготовки 600 мм, наружный диаметр 50 мм, внутренний диаметр 40 мм. Сигнал с токовихревого датчика BENTLY – NEVADA подавался через усилитель на РС и обрабатывался при помощи программы Sound forge.

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ СТАБИЛИЗАЦИИ ОСИ НЕЖЕСТКИХ ВАЛОВ ПРИ РАЗЛИЧНЫХ ВИДАХ ОБРАБОТКИ

На рис. 2. и 3. показаны установка самоцентрирующихся люнетов на станке для обработки нежесткого вала и СЦЛ в процессе обработки, соответственно [2, 3].

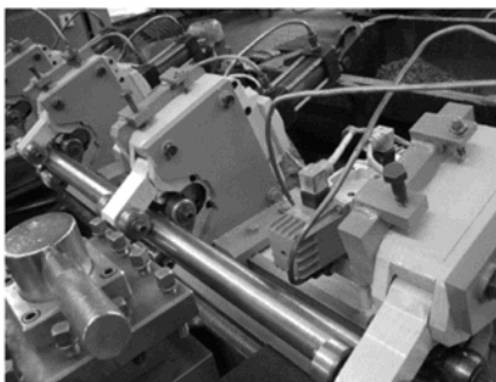


Рис. 2. Установка самоцентрирующихся люнетов на станке при обработке нежесткого вала

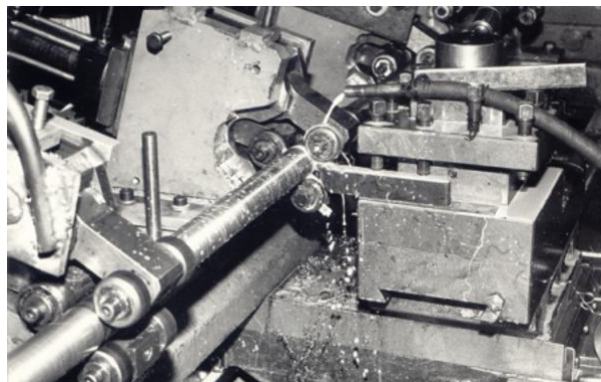


Рис. 3. СЦЛ в процессе обработки нежесткого вала

Анализ экспериментальных зависимостей показал, что при резании форма оси детали меняется с ростом частоты вращения: при малой частоте вращения – форма кривой близка к статической; с ростом частоты вращения форма оси деформируется. При резании форма оси нежесткой близка к форме заготовки на холостом ходу, а величина смещения оси S_M зависит от характера процесса резания и возрастает в 2 ÷ 3 раза с возникновением автоколебаний. С уменьшением изгибной жесткости заготовки не только увеличивается смещение оси, но и меняется ее форма; увеличивается ее отличие от статической кривой прогибов. В систему стабилизации оси МЖД в описываемых экспериментах входили два СЦЛ. Точение с использованием системы проводилось на тех же режимах и заготовках, что и без системы. Результаты экспериментов показали, что наибольшее смещение оси детали при точении с системой

уменьшилось в 4...10 раз. Заготовки $l = 600$ мм, диаметр отверстия $d = 42$ мм обрабатывали двухлезвийной расточной головкой без системы и с системой при следующих режимах резания: $n = 710$ об/мин, $S = 0,27 - 0,5$ мм/об; без системы в два прохода с глубиной резания $t_1 = 0,7$ мм и $t_2 = 0,3$ мм; с системой за один проход $t = 1$ мм.

В исходном состоянии, перед процессом резания, все СЦЛ работают в режиме демпферов, кроме установленных у передней и задней бабок и работающих в режиме жестких опор. Это условие необходимо для центрирования оси детали относительно технологической оси станка. Опорные поверхности детали в местах установки люнетов предварительно накатывают, корректируя форму базовой поверхности.

Наибольшее отклонение от цилиндричности с использованием системы уменьшилось в 3...5 раз, но главное, что профилограммы показывают значительное приближение формы детали к цилиндрической, о чем нельзя сказать при измерении диаметров в различных сечениях. Прибором TAYLOR-HOBSON строились круглограммы поперечных сечений заготовок, которые использовались в качестве базовых поверхностей. Анализ круглограмм показал, что отклонение от круглости базовой поверхности после накатки уменьшается в 1,3...2 раза в зависимости от физико-механических свойств материала, его первоначального профиля, рабочего давления и времени накатки.

В ходе эксперимента смещения оси детали записывались в трех сечениях: на холостом ходу, затем в процессе резания. На рис. 3.а,б представлены формы колебаний оси нежесткого детали, полученные при точении без системы стабилизации и с системой. Из анализа колебаний следует, что неуравновешенность заготовки по обороту определяет низкочастотную составляющую (время одного оборота $T = 0,06 \div 1,15$ с), на которую накладывается высокочастотные колебания, причем в случае использования СЦЛ их частота увеличивается, а амплитуда снижается. Высшие гармоники в спектре частот шпиндельной системы определяются погрешностью изготовления направляющих опор (в данном случае, шарикоподшипниками шпинделя и СЦЛ). Заготовка жестко закреплена и определяет низкочастотные колебания.

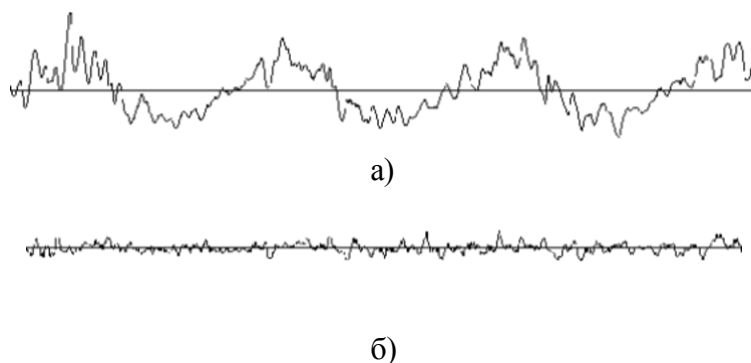


Рис.3. Стенограмма колебаний оси заготовки: а) без применения СЦЛ; б) с системой СЦЛ

Частотный спектр смещается в высокочастотную область пропорционально росту скорости вращения. Собственная частота опорных элементов СЦЛ больше (по конструктивным размерам шарикоподшипники шпинделя и СЦЛ отличаются на порядок), а амплитуда возмущений оказывается ниже. При вращении заготовки СЦЛ гасят возмущения от опор шпинделя в частотном диапазоне $100 \div 500$ Гц (выступают, как демпферы высокочастотных смещений заготовки).

Данный образец также характеризуется минимальными значениями увода и разбивки отверстия, малой амплитудой поперечных колебаний, наличием интенсивных крутильно-продольных колебаний.

Анализ круглограмм (рис. 4) показал, отклонение от круглости поверхности, обработанной с помощью системы, уменьшается в $1,3 \div 2$ раза. Из записей колебаний установлено, что при увеличении оборотов шпинделя n увеличивается амплитуда смещений (от 0,29 до 0,52 мм). При установке детали в СЦЛ амплитуда смещений уменьшается до $0,03 \div 0,06$ мм.

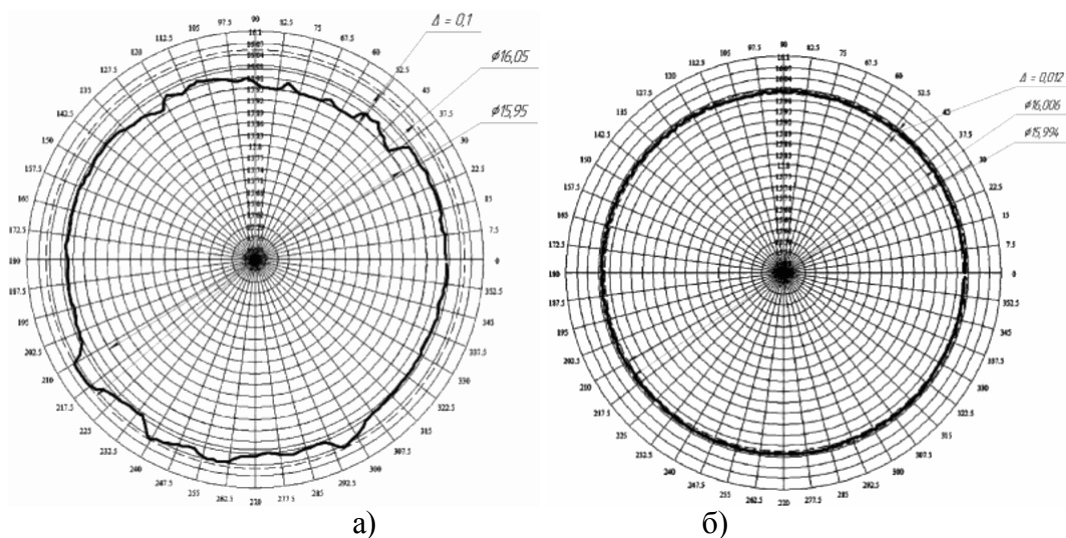


Рис. 4. Сравнительный анализ круглограмм просверленных отверстий: традиционное сверление ($n = 400$ об./мин.) – а), сверление с ВП ($l = 140$ мм, $n = 400$ об./мин.) – б)

Для СЦЛ, устанавливаемых относительно необработанной на данном проходе поверхности, создают давление, обеспечивающее демпфирование вибраций, причем по ходу передвижения инструментальной системы (расточной оправки при обработке отверстия или резца при точении наружной поверхности) вдоль детали переключение СЦЛ демпфирования в режим жестких опор производят с помощью коммутатора в функции пути, пройденного инструментом и регистрируемого датчиком. СЦЛ, устанавливаемые в узлах изгибных колебаний, могут работать как жесткие опоры.

При резании опоры, между которыми расположена зона резания, для стабилизации оси заготовки переключают в режим жестких люнетов. Естественно, что при точении возникают различные варианты сочетания жестких и демпфирующих опор: их количество может достигать 7-9 в зависимости от длины детали, и естественно, количество комбинаций жестких и демпфирующих опор может быть большим. При смене комбинации СЦЛ происходит смещение собственной частоты подсистемы «заготовка-опоры», в результате чего амплитуда колебаний заготовки в поперечном направлении варьируется, что обусловлено изменением коэффициентов жесткости и демпфирования приведенной данной подсистемы. Необходимо учесть, что и форма упругой оси вращающейся заготовки при этом искажается с изменением кинетической энергии неуравновешенных участков вала, передающейся в зону резания. Следовательно, амплитуда относительных колебаний (АОК) взаимосвязанных подсистем «деталь-опоры» и «резец-суппорт» является переменной. Это приводит к формированию участков по длине заготовки с однородным в пределах участка характером пог-

решностей формы и расположения, а также микропрофиля, и отличающимся друг от друга от участка к участку.

Задача управления динамикой резания сводится или к управлению частотой возмущений в функции изменяющихся собственных частот системы путем изменения режима обработки, или управлению давлением рабочей среды в СЦЛ таким образом, чтобы для новых комбинаций жестких и демпфирующих опор, собственная частота подсистемы изменялась минимально, стабилизируя, тем самым, приведенные коэффициенты жесткости и демпфирования подсистемы «заготовка-опоры».

Для обоснования использования различных комбинаций опор проведен анализ схем установки нежестких валов на токарной операции в стационарных люнетах, работающих в различных режимах.

ТЕОРЕТИЧЕСКОЕ ОБОСНОВАНИЕ УПРАВЛЕНИЯ ДИНАМИКОЙ ОБРАБОТКИ НЕЖЕСТКИХ ВАЛОВ

Для расчета формы оси заготовки при тчении использовали метод начальных параметров [4, 5], при этом для каждого участка составляются переходные матрицы, которые затем последовательно перемножаются. При переходе к промежуточной опоре составляют матрицу промежуточной опоры, которую умножают на предыдущий результат, затем составляются матрицы для следующих участков и сечений. Таким образом получается матрица для многоопорного сложного вала.

Расчетная схема заготовки, установленной в пяти люнетах, показана на рис. 5, где она представлена в виде набора участков невесомых стержней и сосредоточенных масс, а люнеты заменяются как упругие к поперечным смещениям опоры.

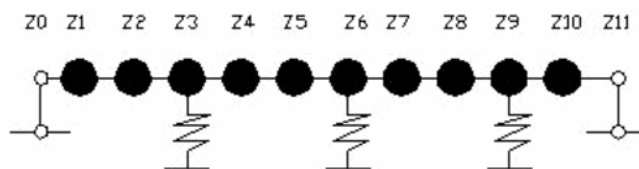


Рис. 5. Расчетная схема для определения формы оси заготовки и ее собственных частот

Матрицу переноса для расчетной схемы получим, перемножив матрицы ее элементов

$$P = G_n M_n Q_n G_{n-1} M_{n-1} G_{n-1, n-2} \dots M_k Q_k G_{k-1} \dots M_0 Q_0, \quad (1)$$

где G_i, M_i, Q_i - переходные матрицы для невесомого участка стержня, сосредоточенной массы и упругой к поперечным смещениям опоры; i – номер участка, $i=0..n$; n – количество участков.

Основное матричное уравнение, связывающее граничные сечения, принятые в виде шарнирных опор:

$$Y_n = P \cdot Y_0, \quad (2)$$

или в развернутом виде

$$\begin{pmatrix} Y_n \\ \varphi_n \cdot l \\ \frac{M_n \cdot l^2}{EJ} \\ \frac{Q_n \cdot l^3}{EJ} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} a_{11} & a_{12} & a_{13} & a_{14} \\ a_{21} & a_{22} & a_{23} & a_{24} \\ a_{31} & a_{32} & a_{33} & a_{34} \\ a_{41} & a_{42} & a_{43} & a_{44} \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} Y_0 \\ \varphi_0 \cdot l \\ \frac{M_0 \cdot l^2}{EJ} \\ \frac{Q_0 \cdot l^3}{EJ} \end{pmatrix}, \quad (3)$$

где EJ - изгибная жесткость некоторого участка вала; l - длина вала; y_i , φ_i , Q_i и M_i - поперечное смещение, угол поворота, поперечная сила и изгибающий момент в i сечении; a_{jk} - коэффициенты матрицы переноса.

Матрица сосредоточенной массы M_i в i -ом сечении имеет вид:

$$M = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ v_i & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix}, \quad (4)$$

где $v_i = \frac{m_i \omega^2 l^3}{EJ}$, а m_i - приведенная к сечению i масса; ω - собственная круговая частота колебаний.

Переходная матрица жесткости для невесомого участка стержня длиной l_i и жесткостью EJ_i выглядит следующим образом:

$$G_i = \begin{pmatrix} 1 & h_i & \frac{h_i^2}{2 \cdot u_i} & \frac{h_i^3}{6 \cdot u_i} \\ 0 & 1 & \frac{h_i}{u_i} & \frac{h_i^2}{2 \cdot u_i} \\ 0 & 0 & 1 & h_i \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix}, \quad (5)$$

где $h_i = l_i/l$, где l_i - длина i -ого участка, l - длина всей детали; $u_i = EJ_i/EJ$, где EJ_i - изгибная жесткость i -ого участка. Жесткость вала на данном участке принимается постоянной.

Сила резания, действующая на вал, может быть принята изменяющейся по синусоидальному закону с частотой, соответствующей частоте вращения заготовки или кратной ей. Периодичность возмущения обусловлена переменным припуском, неуравновешенностью заготовки. Для невесомого участка стержня, нагруженного сосредоточенной гармонической силой (силой резания), зависимость между параметрами в сечениях i и $i-1$ имеет вид:

$$Y_i = G_i Y_{i-1} + \psi_i, \quad (6)$$

где

$$\psi = \begin{pmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \\ \frac{P_i \cdot l^3}{EJ} \end{pmatrix}, \quad (7)$$

где P_i – амплитуда гармонической силы, изменяющейся с частотой Ω .

Переходная матрица невесомого участка стержня с опорой, упругой относительно поперечных перемещений, имеет следующий вид:

$$Q_i = \begin{pmatrix} 1 & h_i & \frac{h_i^2}{2 \cdot u_i} & \frac{h_i^3}{6 \cdot u_i} \\ 0 & 1 & \frac{h_i}{u_i} & \frac{h_i^2}{2 \cdot u_i} \\ 0 & 0 & 1 & h_i \\ -e_i & -e_i \cdot h_i & -\frac{e_i \cdot h_i^2}{2 \cdot u_i} & 1 - \frac{e_i \cdot u_i^3}{6 \cdot u_i} \end{pmatrix}, \quad (8)$$

где $e_i = \frac{c_i \cdot l^3}{EJ}$; c_i – коэффициент жесткости опоры.

Определяются четыре компоненты матриц Y_0 и Y_n , две из которых для шарнирных опор по концам вала равны нулю. Матрицы-столбцы параметров в нулевом и в n -ом сечении:

$$Y_0 = \begin{pmatrix} 0 \\ \varphi_0 \cdot l \\ 0 \\ \frac{Q_0 \cdot l^3}{EJ} \end{pmatrix}; Y_n = \begin{pmatrix} 0 \\ \varphi_n \cdot l \\ 0 \\ \frac{Q_n \cdot l^3}{EJ} \end{pmatrix}. \quad (9)$$

Из первой и третьей строк выражения (3) находим:

$$\left. \begin{aligned} 0 &= a_{12} \varphi_0 \cdot l + a_{14} \cdot Q_0 \cdot l^3 / (EJ) \\ 0 &= a_{32} \varphi_0 \cdot l + a_{34} \cdot Q_0 \cdot l^3 / (EJ) \end{aligned} \right\}. \quad (10)$$

В переходных матрицах при расчете вынужденных колебаний собственная частота вала ω заменяется частотой возмущения Ω . Для расчета вынужденных колебаний решается полученная система (10), находятся прогибы и углы поворота на правом конце вала. По известным параметрам φ_0 и Q_0 и матрицам переноса, производя их перемножение, находятся параметры в любом сечении. Далее выбираются другие значения частоты и повторением этой же схемы расчета находят соответствующие прогибы. Все коэффициенты и константы находят по экспериментальным данным.

Данный алгоритм, использующий метод начальных параметров в матричной форме, был реализован в системе Mathcad. В программе легко варьируются количество и места установки опор (люнетов), положение зоны резания, частота возмущения.

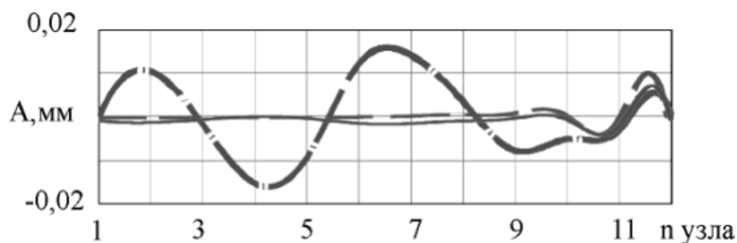


Рис. 6. Форма оси заготовки при различных условиях закрепления, частоты возмущающей силы и расположения зоны резания в узле Z10: опора в узле Z9 жесткая с коэффициентом жесткости $c=2 \cdot 10^6$ Н/м, остальные демпфирующие $c=0,5 \cdot 10^6$ Н/м, $\Omega=314$ рад/с (—); все опоры жесткие $c=2 \cdot 10^6$ Н/м, частота возмущения Ω от 31,4 до 62,8 рад/с (-----); все опоры демпфирующие $c=0,5 \cdot 10^6$ Н/м, $\Omega=314$ рад/с (-·-·-·-)

Результаты расчетов по данному алгоритму приведены на рис. 6 и 7. Особенно следует отметить варьирование амплитуды смещений заготовки в зоне резания от изменения характера опор, частоты возмущающей силы, положения зоны резания. Все эти технологические факторы приводят также к изменению формы оси мало жесткой заготовки, что, как говорилось выше, дополнительно влияет на зону резания за счет неуравновешенности заготовки на участках, удаленных от нее. Кинетическая энергия передается в зону резания, и также способствует варьированию параметров амплитуды относительных колебаний заготовки и реза.

Анализ форм вынужденных колебаний 5-опорного не жесткого длинномерного вала (жест-кость в 10...100 раз меньшей жесткости опор), нагруженного в зоне резания переменной силой и гармонической нагрузкой, в зависимости от частоты колебаний показал, что в диапазоне частот от 0 до 100 Гц могут возбуждаться от первой до пятой собственной формы. Сближая опоры, можно уменьшить погрешности от упругих деформаций подсистемы «заготовка-опоры» до величин соизмеримых с другими погрешностями механической обработки для того, чтобы упругие деформации заготовки не доминировали в суммарной погрешности.

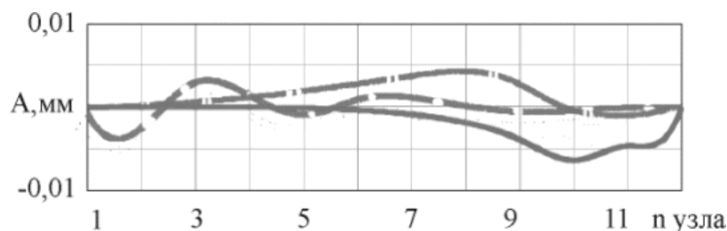


Рис. 7. Форма оси заготовки при различных условиях закрепления, частоты возмущающей силы и расположения зоны резания в узле Z8: опоры в узлах Z6 и Z9 жесткие $c=2 \cdot 10^6$ Н/м, остальные демпфирующие $c=0,5 \cdot 10^6$ Н/м, $\Omega=31,4$ рад/с, (—); все опоры демпфирующие $c=0,5 \cdot 10^6$ Н/м, $\Omega=31,4$ рад/с (-·-·-·-); все опоры демпфирующие $c=0,5 \cdot 10^6$ Н/м, $\Omega=628$ рад/с (----)

Но при использовании большого количества люнетов, кроме большей себестоимости изготовления, необходимо учитывать, что из-за погрешности предварительной выверки люнетов относительно технологической оси (точность установки люнетов до 0,01 мм), возникают дополнительные кинематические возмущения, которые передаются в зону резания.

Если рассматривать вал как сосредоточенную массу, связанную со станиной станка упругой и диссипативной связями и собственной частотой ω , то амплитуда вынужденных колебаний заготовки определяется по формуле:

$$A = \frac{F_0}{c \sqrt{\left(1 - \frac{\Omega^2}{\omega^2}\right)^2 + \frac{4\Omega^2 n^2}{\omega^4}}}, \quad (11)$$

где F_0 - амплитуда возмущающей силы.

Если принять $F_0 = const$, то изменение амплитуды колебаний зависит от коэффициента приведенной жесткости c и собственной частоты колебаний подсистемы заготовки ω . Коэффициент жесткости c изменяется как функция положения зоны резания между опорами. При обработке в люнетах участок заготовки между двумя соседними опорами может рассматриваться как однопролетная балка. Из-за переменной жесткости по длине статический прогиб изменяется в 1,3 – 2 раза. Смещение собственной частоты колебаний подсистемы «заготовка-опоры» обусловлено различным сочетанием жестких и демпфирующих опор. В соответствии с условиями опирания балки, из общей переходной матрицы (1) находится уравнение собственных частот подсистемы «заготовка – опоры»:

$$\begin{vmatrix} a_{12}a_{14} \\ a_{32}a_{34} \end{vmatrix} = 0. \quad (12)$$

Из него определяются собственные частоты системы. Используя описанные модели и алгоритмы расчетов, определяли собственные частоты изгибных колебаний осесимметричных деталей в системе стабилизации оси заготовки, закрепленной в произвольных опорах с переменными параметрами. При изменении комбинаций сочетания жестких и демпфирующих опор собственная частота изменяется в 1,6 раза. В эксперименте на станке РВ106 при определении собственных частот методом измерения затухающих колебаний от импульсной нагрузки зафиксировано изменение собственной частоты в 1,48 раза (от 30 Гц до 44 Гц).

Стационарные незатухающие колебания заготовки описываются зависимостью:

$$y(t) = A \sin(\omega \cdot t - \gamma), \quad (13)$$

где $\operatorname{tg} \gamma = \frac{2\Omega \cdot n}{\omega^2 - \Omega^2}$ - сдвиг фазы перемещения от силы. Как видно из формулы (13)

из-за смещения собственных частот происходит изменение сдвига фазы γ , что приводит к дополнительной нестабильности погрешности обработки из-за изменения величины поперечных смещений.

Для подтверждения теоретических результатов проведен эксперимент на ОАО «Азотрем-маш» (г. Тольятти). Экспериментальное изучение поведения оси нежесткой

детали в процессе точения и на холостом ходу проводилось на промышленной установке на токарно-винторезном станке РВ106. Заготовка вала диаметром 30 мм и длиной 3000 мм из материала 30ХН3А устанавливалась в пяти люнетах. Крайние люнеты работали как жесткие опоры, задавая ось вращения заготовки. Центральные люнеты переключаются из режима жестких опор с коэффициентом статической жесткости $K = 20 \cdot 10^6 \text{ Н/м}$ в режим демпфирующих опор с коэффициентом жесткости $K = 0,5 \cdot 10^6 \text{ Н/м}$.

Сигнал с токовихревого датчика типа BENTLY – NEVADA подавался через усилитель на РС. В ходе эксперимента смещения оси заготовки записывались в ее поперечных сечениях на холостом ходу, а затем в процессе резания.

Результаты экспериментов показали, что наибольшее смещение оси вала при точении

с системой уменьшалось в 4...10 раз. Форма оси заготовки при резании близка к форме ее оси на холостом ходу. При измерениях на холостом ходу были зафиксированы изменения амплитуды смещений колебаний заготовки в одном и том же сечении при смене вариантов комбинаций опор различного характера (от 0,03 до 0,05 мм). Как и показали расчеты, изменение положения зоны резания при различных комбинациях опор приводит к различным величинам смещений заготовки по длине.

При увеличении оборотов шпинделя n от 120 до 400 об/мин амплитуда смещений детали в СЦЛ увеличивается от 0,03 до 0,11 мм. Неуравновешенность заготовки по обороту определяет низкочастотную составляющую колебаний (время одного оборота $T=0,06-1,15\text{с}$), на которую накладываются высокочастотные колебания. Высшие гармоники возмущающей силы обусловлены переменным припуском вследствие погрешности формы заготовки (овальности, огранки). Высшие гармоники в спектре частот шпиндельной системы определяются погрешностью изготовления направляющих опор (в данном случае, шарикоподшипников шпинделя и СЦЛ). При вращении заготовки СЦЛ гасят возмущения от опор шпинделя в частотном диапазоне 100-500 Гц. Без СЦЛ данные частоты близки к высшим гармоникам самой детали и увеличиваются за счет этого.

Если при назначении режима резания обычно предпочитают угловые скорости близко лежащие к зонам собственных частот подсистемы «заготовка-опоры», то использование данной установки дает возможность управлять собственной частотой данной подсистемы для отстройки от резонансной зоны, чтобы не уходить от оптимальных скоростей резания.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Теоретические расчеты показали, что смещение заготовки меньше или при всех жестких люнетах или при двух жестких люнетах, между которыми находится зона резания, и остальных демпфирующих опорах. Эксперимент показал, что в случае обработки заготовок с большой начальной кривизной (1,5 мм на 1 м длины) более целесообразным является использование всех люнетов в демпфирующем режиме. Жесткие люнеты при зажиме совмещают ось заготовки с технологической осью станка за счет ее упругой деформации. После обработки при раскреплении заготовки ее упругая деформация приводит к значительной погрешности. В случае использования демпфирующих люнетов упругая деформация заготовки уменьшается. При обработке заготовок с меньшей величиной коробления предпочтительней вариант с переключающимися жестко-демпфирующими опорами.

Проведен анализ схем закрепления нежесткой заготовки в установке для стабилизации ее оси методом начальных параметров. Обосновано использование различных комбинаций опор с выбором рационального места расположения жестких и

(или) демпфирующих люнетов, что повышает стационарность процесса обработки, улучшает качество формообразование обрабатываемой поверхности. Используя систему стабилизации оси нежестких деталей типа вал на операциях механической обработки за один проход при интенсивных режимах резания можно обеспечить погрешность не более 50 мкм с шероховатостью не более Ra 6,3 мкм за счет управления динамикой нежесткой заготовки. Разработанная установка с технологией ее использования внедрена на ОАО «Азотремаш» для обработки валов роторов.

Используя в роликах СЦЛ не шариковые, а игольчатые подшипники, практически можно добиться формы смещения МЖД в виде чистой синусоиды, что повысит стационарность процесса резания.

Разработана конструкция подсистемы заготовки на основе самоцентрирующих гидравлических люнетов, обеспечивающая повышение поперечной жесткости заготовки в процессе обработки в $3,5 \div 4$ раза.

Список литературы: 1. Драчев О. И. Технология изготовления мало жестких осесимметричных деталей. – Санкт-Петербург: Издательство Политехника, 2005. – 289 с. 2. Draczow O., Taranenko W. Technologia modułowa wytwarzania osiowosymetrycznych wałów długowymiarowych. . ZESZYTY NAUKOWE Politechniki Rzeszowskiej nr 230 МЕХАНИКА, z. 67 - Modułowe Technologie i Konstrukcje w Budowe Maszyn, Rzeszow 2006. –S. 47 – 50. 3. Драчев О. И., Тараненко, Г. В., Тараненко В. А.: Экспериментальные исследования стабилизации оси мало жесткой детали при использовании самоцентрирующих люнетов. ТЕХНОЛОГИИ И ТЕХНИКА АВТОМАТИЗАЦИИ // Сборник трудов международной научно-технической конференции, посвященной 75 – летию ГИУА в г. Ереване 13 – 18 сентября 2008 г. – Ереван: ГИУА. – 2008. С. 57 – 61 4. Орликов М. Л. Динамика станков.- К.: Выща школа, 1989.-272 с., 5. Ивович В. А. Переходные матрицы в динамике упругих систем. - М.: Машиностроение, 1969. – 199 с.

Надійшла до редколегії 22.04.2009 р.

ИССЛЕДОВАНИЕ ДИНАМИЧЕСКОЙ СИСТЕМЫ ТОКАРНОЙ ОБРАБОТКИ НЕЖЕСТКИХ ВАЛОВ

Драчев А.О., Расторгуев Д.А., Тараненко Г.В., Тараненко В.А., Свиць А.

У роботі розроблено конструкції самоцентруючого гідравлічного люнету; приведені результати експериментальних досліджень конструкції люнету при різних видах обробки для стабілізації осі оброблюваної деталі; проведено теоретичне обґрунтування використання різних комбінацій опор; проведений аналіз схем установки нежорстких валів на токарній операції в стаціонарних люнетах, що працюють в різних режимах.

нежесткий вал, токарная обработка, люнет, экспериментальное исследование