

УДК 621.9

*П. Г. Жуковец, А. А. Жолобов, Г. Ф. Шатуров*

## К ВОПРОСУ ЭФФЕКТИВНОГО ИСПОЛЬЗОВАНИЯ СОВРЕМЕННЫХ ТОКАРНЫХ ЦЕНТРОВ

UDC 621.9

*P. G. Zhukovets, A. A. Zholobov, G. F. Shaturov*

## ON THE ISSUE OF EFFECTIVE USE OF MODERN TURNING CENTERS

### Аннотация

Рассмотрены вопросы образования погрешности от упругих перемещений элементов технологической системы резания (ТСР) при обработке на токарных станках с двумя револьверными головками. Доказано, что при двухсторонней токарной обработке, при увеличении производительности в 2 раза по машинному времени, точность обработки может быть в несколько раз выше, чем при односторонней.

### Ключевые слова:

токарная обработка, двухсторонняя обработка, упругие перемещения ТСР, жёсткость, точность обработки.

### Abstract

The article deals with imprecision caused by the elastic displacements of elements of the technological cutting system during processing on turning machines with two turret heads. It has been proved that with double-sided turning and a two-fold increase in productivity with regard to machine time, the processing accuracy can be several times higher compared to single-sided turning.

### Keywords:

turning process, double-sided turning, elastic displacements of technological cutting system, rigidity, processing accuracy.

До недавнего времени эволюция металлообработки происходила по схеме: объект производства – станок – оснастка – инструмент.

В настоящее время в связи с созданием новых инструментальных материалов на основе нанотехнологий, способных вести обработку поверхностей деталей на высоких скоростях резания, появилась необходимость создания технологических систем, которые могли бы использовать в полной мере возможности новых инструментов.

Так, созданный нанокубический нитрид бора (микробор) имеет теплоустойчивость около 1500 °С, что более чем в 2 раза выше теплоустойчивости природного алмаза и в 1,4 раза выше синтети-

ческого алмаза.

Интересны результаты исследований в производстве инструментальных пластин за счёт нанесения на их рабочие поверхности методами напыления конденсаций паровой фазы (PVD) или химического осаждения из газовой фазы (CVD) многослойных карбидных, нитридных, комбинированных и других покрытий. Следует отметить, что при общей толщине такого покрытия 10...20 мкм в него вмещается несколько сотен слоев иногда разных материалов и их соединений.

Исследования в этом направлении, проведённые в США, Китае, Японии, Чехии, России, Беларуси и других странах, показали, что наиболее эффектив-



ными являются покрытия типа TiAl(N), Ti(C, N), Nb(N) и др. [1].

Применение новых инструментальных материалов и покрытий позволяет в 2...3 раза повысить скорость резания конструкционных сталей. Кроме того, появилась уникальная возможность замены энерго- и теплонасыщенного процесса шлифования закалённых поверхностей деталей лезвийной обработкой, что предотвращает шаржирование и существенно снижает износ этих и контактируемых с ними поверхностей в сопряжении деталей машин.

Наряду с созданием и совершенствованием инструментальных материалов проводится серьёзная работа по разработке условий надёжной установки и крепления инструмента, а также подвода охлаждающей среды непосредственно в зону резания. В качестве такой среды успешно используется сжатый воздух для обдува зоны резания или туман на основе масла растительного происхождения.

Приведённые мероприятия по разработке и внедрению в технологию металлообработки высокоэффективного режущего инструмента потребовали создания новых станков и технологической оснастки, отличающихся высокой точностью, скоростью главного движения и подачи, жёсткостью, виброустойчивостью, возможностью компенсации тепловых явлений, сопровождающих обработку, и прочее.

В связи с этим и не только в последние пару десятилетий на новый качественный этап вышло и станкостроение. Внедрение в теорию и практику станкостроения 3D-моделирования и метода конечных элементов позволило существенно повысить жёсткость станин при значительном снижении их металлоёмкости. За счёт применения современных опор и технологии формирования шпиндельных узлов их частота вращения доведена до 50 000 мин<sup>-1</sup> и более при погрешностях формируемых поверхностей в считанные микрометры.

При таких высоких частотах вращения заготовок или инструментов особую обеспокоенность вызывают вибрации, являющиеся следствием множества факторов, которые сопровождаются вынужденными автоколебаниями технологической системы резания (ТСР).

В направлении создания станин, отличающихся высокой эффективностью гашения вибраций, серьёзных успехов достигли учёные в Китае и Чехии, где для изготовления этих корпусных базовых деталей был разработан и внедрён в производство так называемый способ холодного минерального литья. Суть этого способа заключается в том, что заготовки станин формируют из наполнителей в виде натуральной мраморной или гранитной крошки и полиэфирной смолы (типа эпоксидной) с добавлением красителей. По данным чешского завода «Хеб», такие станины, армированные, например, стальными направляющими, гасят вибрации в 6 раз эффективнее чугуновых и в десять – стальных сварных. Кроме виброустойчивости, такие станины обладают химической стойкостью и термической стабильностью.

Особое внимание уделено управляющим программам (УП) и механизмам их отработки. УП для новых высокоскоростных методов формирования поверхностей деталей характеризуются сложностью, имеют большие объёмы памяти и высокую скорость вычислений с удобным интерфейсом их редактирования.

На основании вышеизложенного видно, что внедрение в металлообработку комплекса мероприятий по многим направлениям позволяет вывести на новую качественную основу формирование поверхностей деталей, в том числе и разнообразных валов на станках с ЧПУ.

Однако изложенные выше мероприятия не решают полностью проблему обеспечения точности размеров и формы обрабатываемых поверхно-



стей, особенно при формировании нежёстких валов.

Есть возможность увеличения сопротивления силам резания за счёт использования люнетов, но такой приём не способствует интенсификации операции, а, наоборот, увеличивает её трудоёмкость.

На основании анализа современных способов формирования поверхностей валов и возможностей токарных центров далее в статье приведены теоретические исследования по особенностям одновременного повышения точности и производительности обработки за счёт использования двухстороннего резания на станках, имеющих два суппорта или две револьверные головки, например, типа «Spinner».

В технологической системе (ТС), состоящей из обрабатываемой заготовки, узлов станка, приспособления, под воздействием сил резания при обработке появляются упругие перемещения.

Во многих случаях величина этих перемещений может быть велика и оказывать преобладающее влияние на общую погрешность обработки.

В процессе резания на заготовку и резец действует одинаковая по модулю и противоположная по направлению сила резания, которая для удобства разлагается на три составляющие  $P_x$ ,  $P_y$ ,  $P_z$  по осям координат. Как показывают многочисленные исследования, влияние на точность составляющих  $P_x$  и  $P_z$  значительно меньше, чем  $P_y$ . Поэтому в работе ограничились влиянием только радиальной составляющей силы резания  $P_y$ , которая оказывает доминирующее влияние на точность обработки.

Общее перемещение элементов ТСР в этом случае определяют по формуле

$$y = y_{дет} + y_{з.б.} + y_{н.б.} + y_{суп}, \quad (1)$$

где  $y_{дет}$ ,  $y_{з.б.}$ ,  $y_{н.б.}$ ,  $y_{суп}$  – упругие перемещения детали, задней бабки, пе-

редней бабки и суппорта.

Для односторонней токарной обработки одним резцом погрешность от упругих перемещений элементов ТСР вычисляют по следующей формуле:

$$y = P_y \cdot w_{дет} \left( \frac{l_1}{l} \right)^2 \left( 1 - \frac{l_1}{l} \right)^2 + P_y \left( 1 - \frac{l_1}{l} \right)^2 \cdot w_{з.б.} + P_y \left( \frac{l_1}{l} \right)^2 \cdot w_{н.б.} + P_y \cdot w_{суп}, \quad (2)$$

где  $l$  – длина детали;  $l_1$  – расстояние расположения резца от начала обработки, см;  $P_y$  – радиальная составляющая силы резания;  $w_{дет}$ ,  $w_{з.б.}$ ,  $w_{н.б.}$ ,  $w_{суп}$  – податливость детали, задней бабки, передней бабки и суппорта соответственно, мкм/Н.

$$w_{дет} = \frac{l^3 \cdot 10^4}{3E \cdot J}, \quad (3)$$

где  $E$  – модуль упругости,  $E = 2 \cdot 10^7$  Н/см<sup>2</sup>;  $J$  – момент инерции сечения, см<sup>4</sup>; для вала  $J = 0,05 \cdot d^4$ .

В современных условиях для повышения производительности и точности обработка валов производится на оборудовании, имеющем два суппорта и (или) две револьверные головки с инструментами (например, БС-52 «Белстанок», ТТС 300-42 «Spinner» (рис. 1)), с двух сторон заготовки.

При этом возможны следующие варианты обработки:

1) первый резец снимает припуск при перемещении от задней бабки к передней. Второй инструмент одновременно снимает припуск, перемещаясь от передней бабки к задней;

2) второй резец обрабатывает де-



таль от задней бабки к передней, первый – от передней к задней;

3) оба резца обрабатывают заготовку от центра, первый – в направлении

задней бабки, второй – к передней;

4) оба резца обрабатывают заготовку от центра, первый – в направлении передней бабки, второй – к задней.



Рис. 1. Токарный станок с двумя револьверными головками модели ТТС 300-42 фирмы «Spinner»

Из рассмотренных вариантов обработки вала следует остановиться на вариантах 1 и 4, при которых на заготовку накладывается момент от осевых сил резания, уменьшающий перемещение менее жёсткой задней опоры вала (задней бабки станка). Это способствует уменьшению общей погрешности обработки, определяемой из следующего выражения:

$$\Delta d = 2(Y_x - Y_0), \quad (4)$$

где  $Y_0$  – деформация задней опоры вала при  $x = 0$ ;  $Y_x$  – упругая деформация ТСП в месте расположения резца.

Рассмотрим двухстороннюю обработку вала в центрах по варианту 1 (рис. 2).

Вал можно представить как балку, лежащую на двух опорах. Для определения прогиба детали можно использовать метод начальных параметров [2].

Сначала определяют реакции опор  $R_A$  и  $R_B$ :

$$\begin{aligned} \sum M_A &= 0; \\ R_B &= P_1 \left(1 - \frac{l_1}{L}\right) - P_2 \left(1 - \frac{l_2}{L}\right); \end{aligned} \quad (5)$$

$$\sum M_B = 0;$$

$$R_A = P_2 \frac{l_2}{L} - P_1 \frac{l_1}{L}. \quad (6)$$

Начальные параметры находят следующим образом:  $y_0 = y_B = 0$  при  $x = 0$ ;  $y(L) = y_A = 0$  при  $x = L$ .



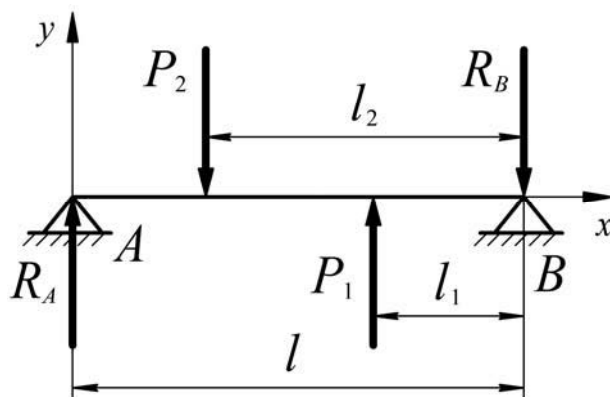


Рис. 2. Схема сил резания при обработке вала:  $P_1, P_2$  – радиальные составляющие силы резания при обработке первым и вторым резцом соответственно

Тогда уравнение упругой линии для детали:

$$y(x) = y_0 + \Theta \cdot x + \frac{1}{3!E \cdot J} \times (R_A \cdot x^3 + P_1(x-l_1)^3 - P_2(x-l_2)^3). \quad (7)$$

Затем определяют начальный угол поворота детали  $\Theta$ .

При  $y(L) = 0$

$$\Theta \cdot L + \frac{1}{6E \cdot J} \times (R_A \cdot L^3 - P_2 \cdot l_2^3 + P_1 \cdot l_1^3) = 0.$$

Отсюда

$$\Theta = \frac{P_2 \cdot l_2^3 - R_A \cdot L^3 - P_1 \cdot l_1^3}{6L \cdot E \cdot J}. \quad (8)$$

Прогиб детали в точке контакта резца 1 с координатой  $l_1$ :

$$y_{dem2} = [\Theta(L-l_2) + \frac{R_A(L-l_2)^3}{6}] \frac{1}{E \cdot J}. \quad (9)$$

Аналогично прогиб детали в точке

контакта резца 2 с координатой  $l_2$

$$y_{dem1} = [\Theta(L-l_1) + \frac{R_A(L-l_1)^3}{6} + \frac{P_2(l_2-l_1)^3}{6}] \frac{1}{E \cdot J}. \quad (10)$$

При этом здесь и далее упругие деформации с индексом 2 (в точке нахождения второго резца) определяются от левого торца детали до середины, а с индексом 1 (в точке нахождения первого резца) – от правого торца до середины. То есть  $y_{dem1}$  соответствует левой половине детали, а  $y_{dem2}$  – правой.

В качестве примера рассмотрена обработка гладкого вала длиной 300 мм. Диаметр заготовки – 40 мм, диаметр детали – 35 мм. Заготовка – предварительно обработанный прокат. Припуск на обработку – 2,5 мм. Подача – 0,2 мм/об. Скорость резания  $V = 160$  м/мин. Обработка проводится на станке БС-42 (аналог ТТС 300-42) с двумя револьверными головками. Податливость передней бабки 0,05 мкм/Н, задней бабки – 0,1 мкм/Н, податливость первого суппорта – 0,05 мкм/Н, податливость второго – 0,04 мкм/Н.

Так как припуск для обоих резцов одинаков, то радиальные составляющие сил резания  $P_1$  и  $P_2$  также будут

равны. Согласно методике расчёта [2]  $P_1 = P_2 = 460$  Н.

Подставляют исходные данные в

зависимости (9) и (10). Результат представлен на рис. 3.

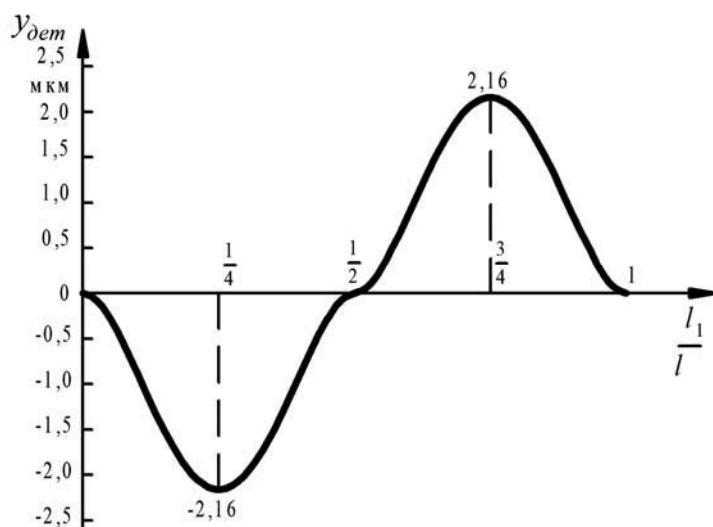


Рис. 3. Упругая деформация оси вала от радиальных составляющих сил резания  $P_1$  и  $P_2$

На погрешность обработки также влияют непрерывные упругие перемещения опор вала, которые происходят под воздействием изменяющихся сил,

действующих на опоры, при продольном перемещении резцов. На рис. 4 показаны упругие перемещения опор [4].

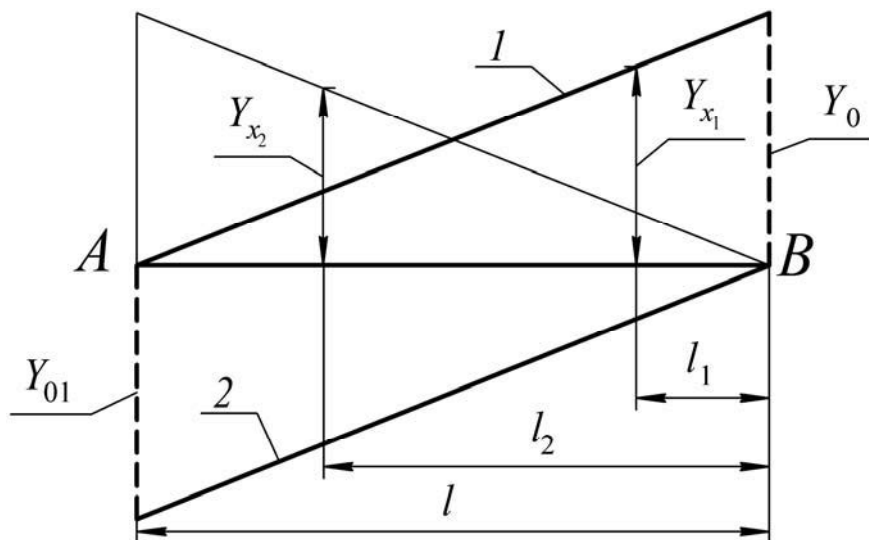


Рис. 4. Упругие деформации опор технологической системы: 1 – упругая деформация задней опоры; 2 – упругая деформация передней опоры;  $Y_0$ ,  $Y_{01}$  – максимальные упругие деформации задней и передней бабок станка (опор вала)

Когда резцы находятся в исходном положении (у торцов детали), имеют

место упругие перемещения опор детали (см. рис. 4):





$$Y_0 = R_B \cdot w_{з.б.}; \quad (11) \quad \text{— для левой половины детали}$$

$$Y_{01} = R_A \cdot w_{н.б.} \quad (12) \quad Y_{x2} = \frac{R_B \cdot w_{з.б.} \cdot (L - l_2) - R_A \cdot w_{н.б.} \cdot l_2}{L}. \quad (14)$$

Упругие перемещения детали от смещения опор в местах положения резцов определяют по следующим зависимостям:

— для правой половины детали

$$Y_{x1} = \frac{R_B \cdot w_{з.б.} \cdot (L - l_1) - R_A \cdot w_{н.б.} \cdot l_1}{L}; \quad (13)$$

Подставляют исходные данные в зависимости (13) и (14). Получается результат, представленный в виде графика на рис. 5.

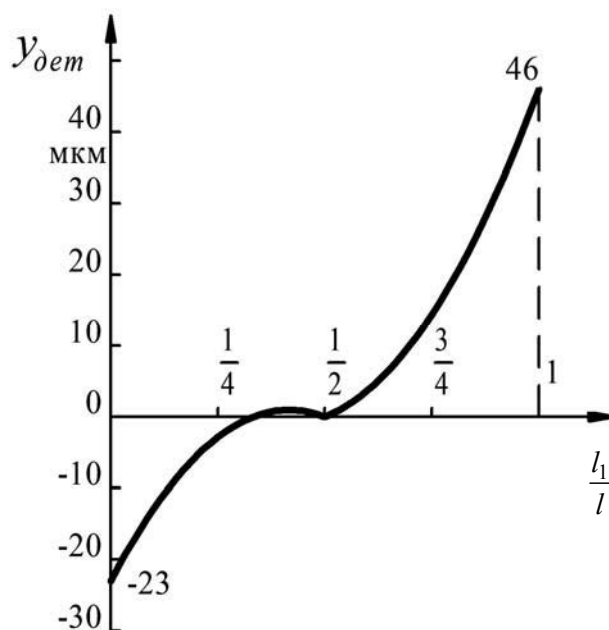


Рис. 5. Перемещение оси вала от смещения опор

Общие упругие перемещения детали от упругих деформаций самой детали и перемещения опор находят следующим образом:

— для правой половины детали

$$Y_{дет1} = y_{дет1} + Y_{x1}; \quad (15)$$

— для левой половины детали

$$Y_{дет2} = y_{дет2} + Y_{x2}. \quad (16)$$

Подставляют данные в зависимости (15) и (16). Получается результат, представленный на рис. 6.

В дальнейшем определяют упругие перемещения детали при односторонней обработке и сравнивают с перемещениями при двухсторонней.

Подставляют исходные данные для односторонней обработки в зависимость (2) (не учитывая последнее слагаемое). Результат этих вычислений представлен в виде графика на рис. 7.



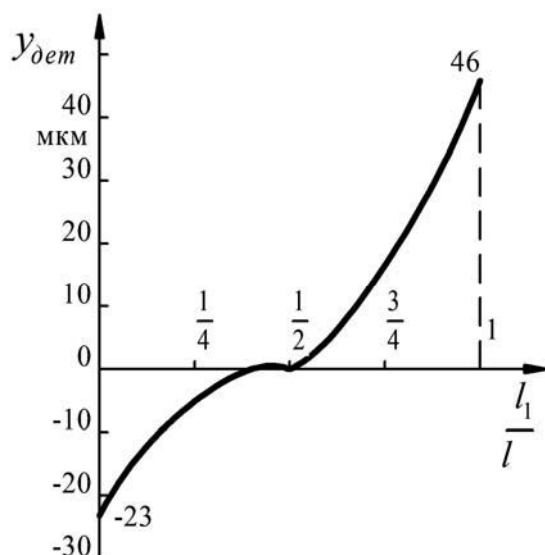


Рис. 6. Общие упругие перемещения детали от упругих деформаций самой детали и смещения опор при двухсторонней обработке

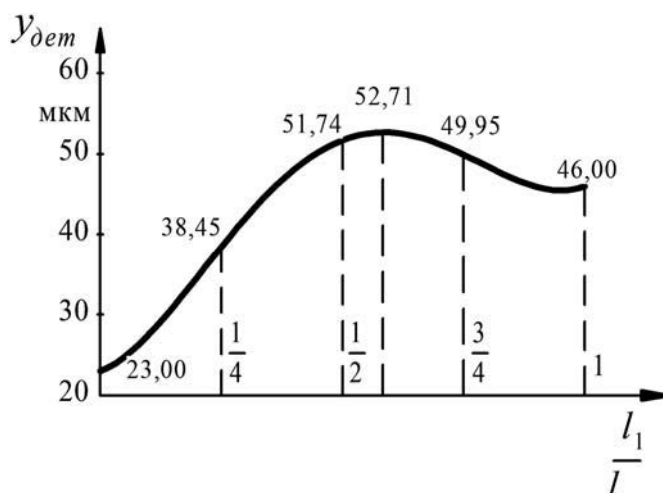


Рис. 7. Общие упругие перемещения детали от упругих деформаций самой детали и смещения опор при односторонней обработке

Для определения общего перемещения элементов ТСР к общим упругим перемещениям детали необходимо добавить постоянное (не зависящее от местоположение резца) упругое перемещение суппорта. Для двухсторонней обработки:

$$y_1 = Y_{dem1} + y_{cyn1} ; \quad (17)$$

$$y_2 = Y_{dem2} + y_{cyn2} , \quad (18)$$

где  $y_1, y_2$  – общее перемещение элементов ТСР справа и слева от середины детали.

Для односторонней обработки используют зависимость (2). Точение производят более жестким суппортом 2. Подставляют исходные данные в зависимости (17), (18) и (2) получают результат, представленный на рис. 8 и 9.





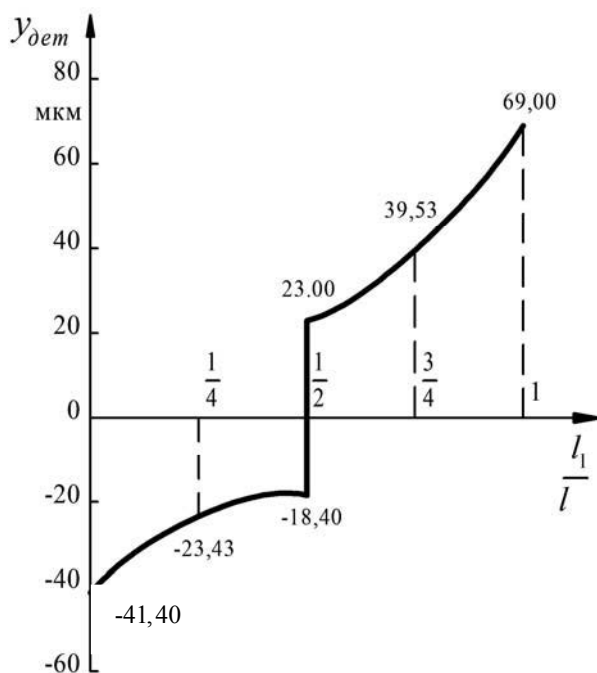


Рис. 8. Общие упругие перемещения ТСП при двухсторонней обработке

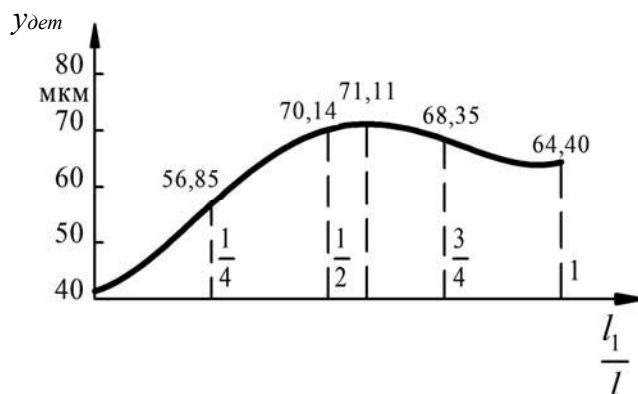


Рис. 9. Общие упругие перемещения ТСП при односторонней обработке

При односторонней обработке методом пробных ходов разность между настроенным диаметром и фактическим диаметром обработки можно компенсировать, вводя соответствующую коррекцию; она равна половине разности фактического и настроенного диаметров.

Погрешность обработки от упругих перемещений [5] определяют по зависимости

$$\Delta = d_{\max} - d_{\min} = 2(y_{\max} - y_{\min}); \quad (19)$$

для односторонней обработки

$$\Delta = 2(71,11 - 41,4) = 59,42 \text{ мкм.}$$

Аналогичным образом можно ввести коррекцию для каждого из резцов при двухсторонней обработке:



$$\Delta = 2 (64,4 - 18,4) = 92 \text{ мкм.}$$

Введя коррекцию на величину перемещений каждого из суппортов в сторону оси детали, можно получить профиль продольного сечения, соответствующего рис. 6.

В этом случае можно увидеть, что реальная цилиндрическая поверхность представляет собой поверхность, приближённую к двум конусам. Для получения поверхности, наиболее приближённой к цилиндрической, достаточно производить обработку цилиндрической поверхности как обработку двух конусов, обратных показанным на рис. 6. Это легко осуществляется на современных станках с ЧПУ, работающих в диалоговом режиме. Достаточно выбрать

цикл «точение конуса» и задать необходимую конусность, которую можно определить по следующим формулам:

– для правого резца

$$C_1 = \frac{Y_{dem1}}{L}; \quad (20)$$

– для левого резца

$$C_2 = \frac{Y_{dem2}}{L}. \quad (21)$$

После ввода коррекции на перемещение суппортов и коррекции конуса получится перемещение элементов ТСР в соответствии с рис. 10.

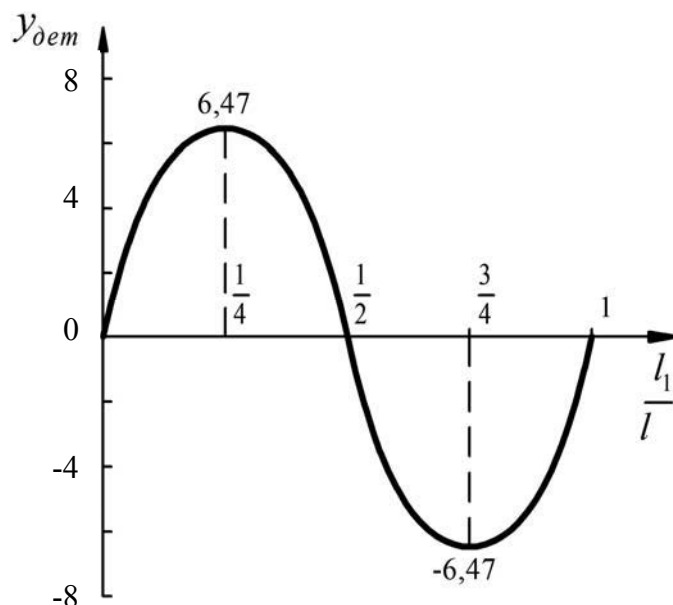


Рис. 10. Общие упругие перемещения ТСР при двухсторонней обработке после введения коррекции

В этом случае погрешность обработки от упругих перемещений

$$\Delta = 2 (6,47 - 0) = 12,94 \text{ мкм.}$$

На основании приведенных расчетов можно увидеть, что двухсторонняя

токарная обработка гладкого вала позволяет повысить производительность обработки по машинному времени не менее, чем в 2 раза. При этом достигается точность обработки в 4,6 раза выше, чем при односторонней.



СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

1. Формирование поверхностей валов суперколлайдеров: монография / В. А. Логвин, А. А. Жолобов, Ж. А. Мрочек, В. М. Никитин. – Могилёв: Белорус.-Рос. ун-т, 2012. – 191 с.: ил.
2. Сопротивление материалов / Под ред. Г. С. Писаренко. – Киев: Вища школа, 1986. – 776 с.: ил.
3. Справочник технолога-машиностроителя: в 2 т. / Под ред. А. Г. Косиловой и Р. К. Мещерякова. – 4-е изд., перераб. и доп. – Москва: Машиностроение, 1985. – Т. 2. – 496 с.: ил.
4. **Жолобов, А. А.** Прогнозирование и обеспечение качества технологических систем на этапах их проектирования и изготовления / А. А. Жолобов. – Могилёв: Белорус.-Рос. ун-т, 2005. – 304 с.
5. **Маталин, А. А.** Технология машиностроения / А. А. Маталин. – Ленинград: Машиностроение, Ленингр. отд-ние, 1985. – 496 с.: ил.

*Статья сдана в редакцию 20 января 2020 года*

**Павел Григорьевич Жуковец**, главный технолог, ОАО «Могилёвлифтмаш».  
E-mail: ZhukovetsPG@liftmach.by.

**Александр Алексеевич Жолобов**, канд. техн. наук, проф., Белорусско-Российский университет.

**Геннадий Филиппович Шатуров**, д-р техн. наук, проф., Белорусско-Российский университет.

**Pavel Grigoryevich Zhukovets**, Chief Technologist, JSC «Mogilevliftmach».  
E-mail: ZhukovetsPG@liftmach.by.

**Aleksandr Alekseyevich Zholobov**, PhD (Engineering), Prof., Belarusian-Russian University.

**Gennady Filippovich Shaturov**, DSc (Engineering), Prof., Belarusian-Russian University.