

Zh. N. Shakenova

Kazakh Automobile and Road Institute named after L.B. Goncharova, Almaty, Kazakhstan.

E-mail: milya_scorpion@mail.ru

**DETERMINATION OF CUTTING SPEED VALUES
FOR PROCESSING A NON-RIGID SHAFT**

Abstract. This article discusses the flexibility of the technological system due to the influence of external shear forces on it during processing of non-rigid parts such as bodies of revolution. In order to reduce the deformation of the part during the P_y cutting force is applied to it, various fastening schemes are used and, accordingly, calculations are made on the rationality of its choice. The bending moments M_1 and M_2 in sections Z_1 and Z_2 are determined in an analytical way (curve part). The cutting force is calculated according to the formula (1), and also according to formulas (2) and (3) there are determined the points of maximum and minimum deflection of the non-rigid shaft. By transforming formulas (1), (2) and (3), the formulas (4), (5) and (6) were derived. Using formula (4), the values of the cutting speed V along the entire length of the shaft part L were calculated, and the cutting force P_y at each fixed point Z_1 to Z_{21} was determined from the obtained expressions (5) and (6). The block diagram and software implementation in the Delphi XE8 environment are presented in which calculations are performed so that the minimum value of the shaft deflection always has a constant value $y = \text{const}$. A graphical dependence of the change in cutting force on the values of the cutting speed is obtained. The developed subsystem will also allow to visually display how you can avoid various errors during the machining of a non-rigid part (shaft).

Key words: cutting speed, cutting force, mechanical machining, shaft deflection, task algorithm, scheme, software module, secondary circuit.

During the processing of non-rigid shafts, the technological system «Machine → Fixture → Tool → Workpiece» is essentially very malleable to the influence of cutting forces (external shear forces) and thereby complicates the processing of the product. All these difficulties can occur due to the displacement of the cutting tool and the workpiece, that lead to errors, the divergence of the axes of the base elements of the MFTW system, as well as thermal and inertial disturbances that affect the technological system, where the deformation of the workpiece increases during turning (in the form of deflection).

Under a non-rigid shaft there is understood when the length L exceeds its diameter \varnothing by 10-12 times, that is, the condition $\frac{L}{d} \geq 10 \div 12$ [1] must be met.

During processing of a workpiece of a non-rigid shaft, it is necessary to reduce the deflection and make it uniform along its entire length under the influence of cutting force, as well as to reduce the imbalance of the rotating workpiece. In order to reduce the deflection of the non-rigid shaft under the influence of the radial cutting force P_y , there are used various fastening schemes. The verification calculation determines the feasibility of choosing a fastening scheme, in which the maximum value and the minimum value of the deflection of the workpiece are found. The Figure 1 shows the deflection of the workpiece under the influence of the cutting force P_y . The non-rigid shaft workpiece is fixed rigidly in the lathe chuck by the front end and by the end with the rear center (tailstock), which has less rigidity. Therefore, the workpiece of the non-rigid shaft will be presented as a beam on two supports. In order to determine the deflection of the workpiece, there were determined the reactive forces $R_A = R_B = \frac{P_y}{2} = Z_1 = Z_2 = \frac{L}{2}$ [2]. The values of the bending moment in the section Z_1 $M_1(Z_1) = P_y \cdot \frac{Z_1}{2}$ in the interval

$(0 \leq Z_1 \leq \frac{L}{2})$ and the bending moment in the section Z_2 $M_2(Z_2) = R_a \cdot Z_2 - P_y \left(Z_2 - \frac{L}{2}\right)$ in the interval $(\frac{L}{2} \leq Z_2 \leq L)$ were found. Therefore, having carried out mathematical transformations, formulas were derived for calculating the deflection in the intervals $0 \leq Z_1 \leq \frac{L}{2}$ and $\frac{L}{2} \leq Z_2 \leq L$ [3].

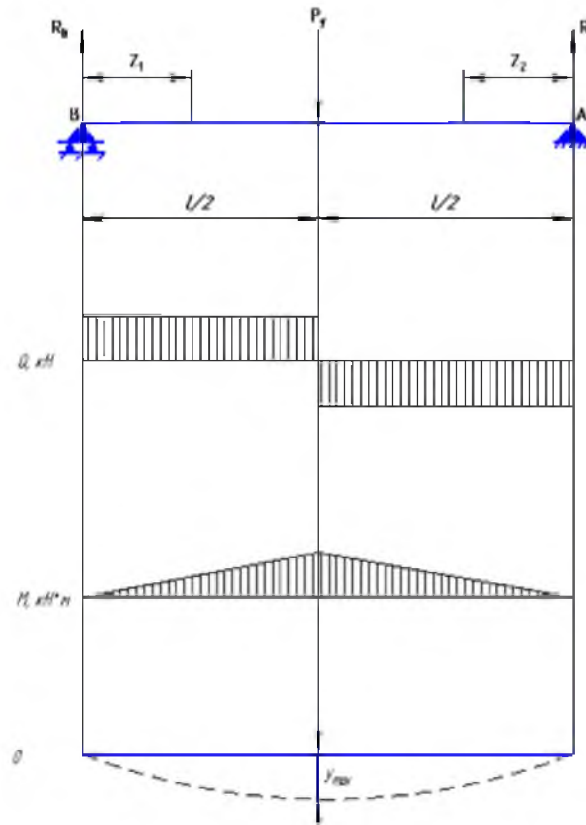


Figure 1 – Determination of the maximum deflection of a non-rigid shaft

The purpose of this work is to increase the accuracy of processing, the constancy of the shape and geometric dimensions of non-rigid shafts. In order to achieve this goal, it is necessary to determine the values of the cutting speed V so that the minimum deflection value remains constant along the entire length of the workpiece during turning, programmatically to calculate and to create a graph the values of cutting speed V and a graph of P_y dependence on cutting speed V .

The radial cutting force can be considered as a function of several arguments [4, 5]:

$$P_y = C_{py} \cdot t^x \cdot S^y \cdot V^n \cdot K_p, \quad (1)$$

where C_{py} – coefficient of material and processing conditions; t^x – cutting depth (allowance); S^y – feed (feed rate); V^n – cutting speed; K_p – total correction coefficient.

Using the above formula (1), we determine the cutting force:

$$P_y = 243 \cdot 2^{0.9} \cdot 0,21^{0.6} \cdot 50,27^{-0.3} \cdot 2,48,$$

$$y = \frac{P_y}{48 \cdot E \cdot J_x} \cdot \left[4 \cdot Z^3 - 8 \left(Z - \frac{L}{2} \right)^3 - 3 \cdot L^2 \cdot Z \right] \quad (2)$$

$$y = \frac{P_y}{48 \cdot E \cdot J_x} \cdot [4 \cdot Z^3 - 3 \cdot L^2 \cdot Z] \quad (3)$$

According to expressions (2) and (3), in the intervals $0 \leq Z_1 \leq \frac{L}{2}$ and $\frac{L}{2} \leq Z_2 \leq L$ there were determined points with the maximum deflection of the non-rigid shaft $y=0.06878$ and the minimum deflection $y=0.010281885$.

Let carry out the permutation of the variables in the formula (1) and by the inverse task we obtain the formula (4) by which the values of the cutting speed V along the entire length of the workpiece of a non-rigid shaft will be calculated.

$$V^n = \frac{0,8 \cdot P_y}{\sqrt{C_{py} \cdot t^x \cdot S^y \cdot K_p}} \Rightarrow V = \left(\frac{P_y}{C_{py} \cdot t^x \cdot S^y \cdot K_p} \right)^{\frac{1}{n}} \tag{4}$$

Transforming expression (2) and expression (3) we obtain formulas (5) and (6), by which it will be possible to determine how the cutting force changes from the cutting speed at the points of contact along the entire length of the workpiece of a non-rigid shaft.

$$P_y = \frac{y \cdot 48 \cdot E \cdot J_x}{4Z^3 - 8\left(Z - \frac{L}{2}\right)^3 - 3 \cdot L^2 \cdot Z} \tag{5}$$

$$P_y = \frac{y \cdot 48 \cdot E \cdot J_x}{4Z^3 - 3 \cdot L^2 \cdot Z} \tag{6}$$

To determine the values of the cutting speed V along the entire length L of the workpiece, there is developed a step-by-step calculation algorithm according to State standard 19.701-90, which is presented on figure 2 [6].

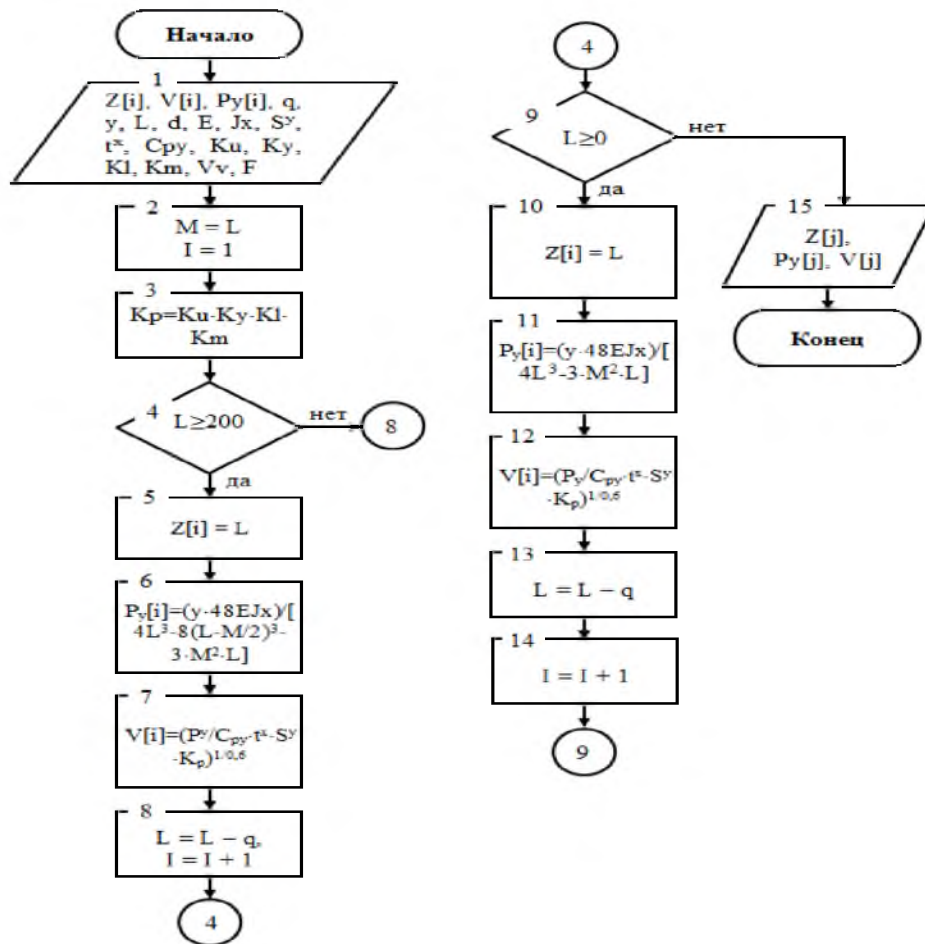


Figure 2 – A block diagram of the calculations [6]

As a basis, we select the value of the minimum deflection $y=0.010281885$, then we change the cutting speed V along the entire length of the work piece by a step of 20 mm, but so that the specified amount of deflection always remains constant. According to the above formulas, we carry out the calculations.

At the point $Z_1=400$. At the starting point Z_1 the cutting force $P_{y1}=136.12$, then $V_1=50.25$.

$Z_2=380$ $P_{y2}=136.12$ $V_2=50.25$	$Z_7=280$ $P_{y7}=25.69$ $V_7=13002.5$	$Z_{12}=180$ $P_{y12}=20.65$ $V_{12}=26852.26$	$Z_{17}=80$ $P_{y17}=35.83$ $V_{17}=4292.08$
$Z_3=360$ $P_{y3}=68.75$ $V_3=489.68$	$Z_8=260$ $P_{y8}=23.16$ $V_8=18437.80$	$Z_{13}=160$ $P_{y13}=21.56$ $V_{13}=23204.73$	$Z_{18}=60$ $P_{y18}=46.62$ $V_{18}=1785.18$
$Z_4=340$ $P_{y4}=46.62$ $V_4=1785.18$	$Z_9=240$ $P_{y9}=21.56$ $V_9=23204.73$	$Z_{14}=140$ $P_{y14}=23.16$ $V_{14}=18437.80$	$Z_{19}=40$ $P_{y19}=68.75$ $V_{19}=489.68$
$Z_5=320$ $P_{y5}=35.83$ $V_5=4292.08$	$Z_{10}=220$ $P_{y10}=20.65$ $V_{10}=26852.26$	$Z_{15}=120$ $P_{y15}=25.69$ $V_{15}=13002.5$	$Z_{20}=20$ $P_{y20}=136.12$ $V_{20}=50.25$
$Z_6=300$ $P_{y6}=29.60$ $V_6=8098$	$Z_{11}=200$ $P_{y11}=20.35$ $V_{11}=28232.43$	$Z_{16}=100$ $P_{y16}=29.60$ $V_{16}=8098$	$Z_{21}=0$ $P_{y21}=136.12$ $V_{21}=50.25$

The processing of a work piece of a non-rigid shaft will be draft, since the cutting depth is $t=2$ mm, without auxiliary equipment (lunette), since the length of the work piece is $L=400$ mm, $d=40$ mm.

On the basis of calculations, there was developed a software module in the object-oriented programming language Delphi XE8 [7,8] for an automatic control system along the secondary circuit (V cutting speed control). The figure 3 shows the software implementation interface and a graph of the cutting speed V for stable values of bends along the entire length of the work piece, as well as a graph of the cutting force P_y values from the cutting force V for stable values of bends along the entire length of the work piece.

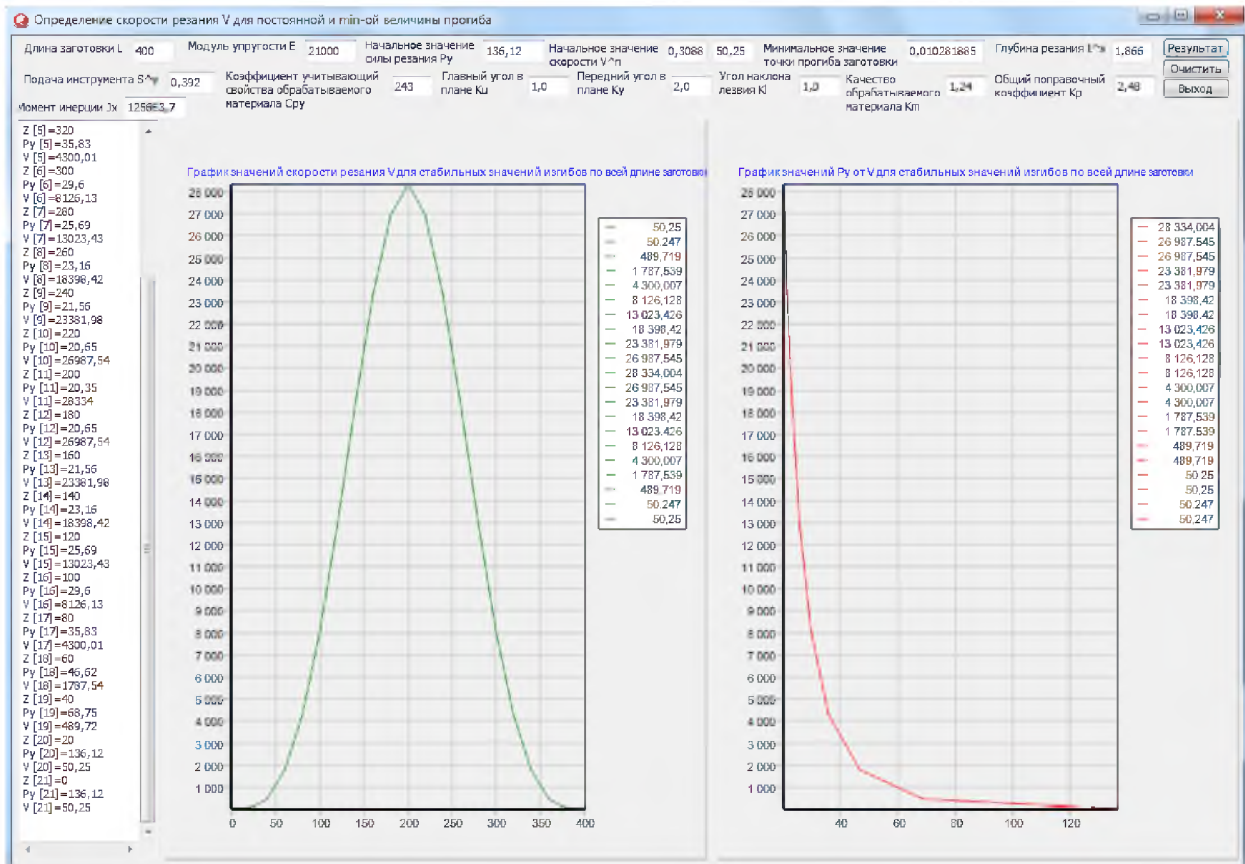


Figure 3 – Determination of the cutting speed V for a constant shaft deflection

Obtained results:

1. By mathematical transformations, there was obtained the formula $V = \left(\frac{P_y}{C_{py} \cdot t^x \cdot S^y \cdot K_p} \right)^{\frac{1}{n}}$ for the necessary changes in the values of the cutting speed and the necessary values of the cutting force P_y in order to maintain a constant value of the deflection of the work piece.

2. Developed a step-by-step calculation algorithm and software application. The software application does not require special skills for the user (designer-technologist, turner-processor), thereby significantly reducing the time required for calculations, it also allows to vary the data in choosing the length of the work piece, its diameter, cutting depth, tool feed, cutting speed, determining the cutting force.

3. Received graphs of the values of the cutting speed and a graphical dependence of the change in cutting force on the values of the cutting speed.

4. Increased productivity due to processing in one pass without reinstallation.

5. The ability to process work pieces of a non-rigid shaft without readjustment by changing data in the developed software module.

Therefore, all this will reduce the cost of manufacturing and engineering products, such as non-rigid shafts.

Ж. Н. Шакенова

Л. Б. Гончаров атындағы Қазақ автомобиль-жол институты, Алматы, Қазақстан

ЖҰМСАҚ БІЛІКТІ ӨНДЕУДЕГІ КЕСУ ЖЫЛДАМДЫҒЫНЫҢ МӘНІН АНЫҚТАУ

Аннотация. Машина жасау өнімнің дәлдігі мен сапасы конструкция мен материал қасиетінің (қатаңдық, тозуға төзімдік, беріктік, дірілге төзімдік және тағы басқа шамалар) жиынтығына тәуелді. Жұмсақ білікті өңдеу үрдісі күрделі және көп еңбекті қажет етеді, өйткені жону арқылы өңдеу кезінде технологиялық жүйенің қатаңдығына тәуелді деформацияға байланысты түрлі қателік анықталады. Осы мақалада айналмалы дене түріндегі жұмсақ тетіктерді жону арқылы өңдеу кезінде сыртқы көлденең күштердің технологиялық жүйеге әсерінің икемділігі қарастырылады. Тетікке радиалды кесу күші P_y әсер еткен кездегі деформацияны азайту үшін бекітудің түрлі сұлбалары қолданылады және оңтайлы таңдау жасауға қажетті есептеу жүргізеді. Жұмсақ білікті өңдеуде бекітудің төрт әдісін қолданылады: 1 – жұмсақ дайындаманы патронға немесе консолды жиектемеге бекіту; 2 – жұмсақ дайындаманы патронға немесе біліктің бос ұшын люнетке қысу арқылы жиектемеге бекіту; 3 – жұмсақ тетіктерді люнеттің көмегісіз орталыққа бекіту; 4 – жұмсақ дайындаманы люнетпен бірге аралық ортасына бекіту. Қателік шамасын анықтау мен азайту үшін қосалқы жабдықсыз (люнет) «3» бекіту сұлбасы таңдап алынған. Аналитикалық тәсілмен (эпюр аймақтары) Z_1 және Z_2 қималарындағы ию моменттері $M_1(Z_1) = \frac{P_y}{2} \cdot Z_1$ және $M_2(Z_2) = R_a \cdot Z_2 - P_y \left(Z_2 - \frac{l}{2} \right) = \frac{P_y}{2} \cdot Z_2 - P_y \left(Z_2 - \frac{l}{2} \right)$ анықталды. Радиалды кесу күші P_y (1) өрнекпен анықталып, $0 \leq Z_1 \leq \frac{l}{2}$ аралығына (2) өрнек, ал $\frac{l}{2} \leq Z_2 \leq L$ аралығына (3) алынды. Қол жеткізген нәтижелер бойынша жұмсақ біліктің ең үлкен және ең кіші ию нүктелері анықталды. (1), (2) және (3) өрнектерді түрлендіру арқылы (4), (5) (6) өрнектер алынды. (4) Өрнек Z_1 ден Z_{21} дейінгі аралықтағы әрбір тіркелген нүктеде белгілі кесу күші арқылы P_y (5 және 6 өрнек) $0 \leq Z_1 \leq \frac{l}{2}$ және $\frac{l}{2} \leq Z_2 \leq L$ аралығында берілген адыммен q жұмсақ біліктің ұзындығы L бойымен кесу жылдамдығын V анықтауға мүмкіндік берді. Алынған есептеу өрнегі кесу үрдісі кезінде жұмсақ біліктерді токарлық өңдеу дәлдігін арттырады. Есептеу уақытын қысқарту және нәтижеге тез қол жеткізу үшін «АЖЖ-технолоҒ» бағдарламалық кешеннің «II контур бойынша кесу жылдамдығын реттеу» бағдарламалық модулі пайдаланылды. Бұл «АЖЖ-технолоҒ» бағдарламалық кешені Embarcadero RAD Studio Delphi XE8 нысанды-бағытталған ортада жасалған бірнеше бағдарламалық модульден тұрады және 16K20 жону-бұрама кескіш білдекте жұмсақ біліктерді өңдеу кезінде жұмыс режимін автоматты реттеу жүйесінің (АРЖ) платформасына бейімделген. Жасалған алгоритм (блок-сұлба) бойынша «II контур бойынша кесу жылдамдығын реттеу» бағдарламалық модулі кесу жылдамдығының V әсерінен T15K6 кескіш аспабының жұмсақ білік дайындамасының ұзындығы бойымен орын ауыстырып, белгіленген нүктеде Z_i дайындамаға түсіретін қысымын есептейді. Сондай-ақ «II контур бойынша кесу жылдамдығын реттеу» бағдарламалық модульде келесі ауыспалы шамаларды түрлендіруге болады: білік дайындамасының ұзындығын L ; білік

дайындамасының диаметрі d ; адым q ; әдін t (кесу тереңдігі); өңделетін материал қасиеттерін ескеретін коэффициент C_{Py} ; кескіш аспап берілісін S ; кескіш аспаптың негізгі бұрышының әсерін ескеретін түзету коэффициенті K_{\perp} ; кескіш аспаптың алдыңғы бұрышының әсерін ескеретін түзету коэффициенті K_{\angle} ; кескіш аспаптың негізгі кесу жиегінің ескею бұрышының әсерін ескеретін түзету коэффициенті K_{τ} ; өңделетін материал сапасының күш тәуелділігіне әсерін ескеретін түзету коэффициенті K_{σ} және жалпы түзету коэффициентін анықтау K_p ; кесу күшінің P_y және кесу жылдамдығының V бастапқы мәндерін беру. Ауыспалы мәнді түрлендіру компьютерлік тәжірибе жүзінде қатаң біліктің ұзындығы бойымен тұрақты июге арналған кесу жылдамдығының мәнін график түрінде динамика өзгерісін және радиалды кесу күшінің P_y жылдамдыққа тәуелділігін бейнелеуге, сонымен қатар жұмсақ тетіктерді механикалық өңдеу үрдісінде пайда болуы мүмкін түрлі қатенің алдын алуға мүмкіндік береді.

Түйін сөздер: кесу жылдамдығы, кесу күші, механикалық өңдеу, білікті ию, тапсырма алгоритмі, бағдарламалық модуль, екінші контур.

Ж. Н. Шакенова

Казахский автомобильно-дорожный институт им. Л. Б. Гончарова, Алматы, Казахстан

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ЗНАЧЕНИЙ СКОРОСТИ РЕЗАНИЯ ДЛЯ ОБРАБОТКИ НЕЖЁСТКИХ ВАЛОВ

Аннотация. От совокупности свойств конструкций и материала (жёсткость, износостойкость, прочность, виброустойчивость и другие параметры) зависит качество и точность машиностроительных изделий. Считается, что процесс обработки нежёстких валов – весьма сложный и трудоемкий, так как при токарной обработке выявляются различные погрешности, возникающие за счёт деформаций, зависящих от жёсткости технологической системы. В приведенной статье рассматривается податливость технологической системы вследствие влияния на неё внешних поперечных сил при токарной обработке нежёстких деталей типа тел вращения. Для того, чтобы уменьшить деформацию детали при воздействии на неё радиальной силы резания P_y , используют различные схемы крепления и соответственно производят расчёты на рациональность её выбора. В большинстве при обработке нежёстких валов используют четыре способа крепления: 1 – закрепление нежёсткой заготовки в патроне или на оправке консольно; 2 – закрепление нежёсткой заготовки в патроне или на оправке с поджатием свободного конца нежёсткого вала на люнет; 3 – закрепление нежёсткой детали в центрах без люнета; 4 – закрепление нежёсткой заготовки в центрах с люнетом в середине пролета. Для снижения и определения величины погрешности была выбрана схема крепления «3» без вспомогательного оборудования (люнета). Аналитическим способом (участки эпюр) определены изгибающие моменты $M_1(Z_1) = \frac{P_y}{2} \cdot Z_1$ и $M_2(Z_2) = R_{\alpha} \cdot Z_2 - P_y \left(Z_2 - \frac{l}{2} \right) = \frac{P_y}{2} \cdot Z_2 - P_y \left(Z_2 - \frac{l}{2} \right)$ в сечениях Z_1 и Z_2 . Радиальная сила резания P_y рассчитана по формуле (1) и соответственно через подстановку переменных были получены выражение (2) для интервала $0 \leq Z_1 \leq \frac{L}{2}$ и выражение (3) для интервала $\frac{L}{2} \leq Z_2 \leq L$. По полученным результатам определены точки максимального и минимального прогиба нежёсткого вала. Путем математического преобразования формул (1), (2) и (3) были выведены формулы (4), (5) и (6). Формула (4) позволила вычислить необходимые значения скорости резания V по длине нежёсткого вала L с заданным шагом q в интервале $0 \leq Z_1 \leq \frac{L}{2}$ и в интервале $\frac{L}{2} \leq Z_2 \leq L$ с определенной силой резания P_y (формулы 5 и 6) в каждой фиксированной точке с Z_1 по Z_{21} . Полученные формулы расчёта позволяют повысить точность токарной обработки нежёстких валов в процессе резания. Для сокращения времени и получения быстрых результатов расчёта был использован программный модуль «Регулирование скорости резания по II контуру» программного комплекса «САПР-технолог». Данный программный комплекс «САПР-технолог» разработан в объектно-ориентированной среде Embarcadero RAD Studio Delphi XE8 и состоит из нескольких программных модулей, адаптирован под платформу автоматической системы регулирования (АСР) режимов работ при обработке нежёстких валов на токарно-винторезном станке 16K20. По разработанному алгоритму (блок-схема) программный модуль «Регулирование скорости резания по II контуру» просчитывает, как режущий инструмент Т15К6 под действием скорости резания V перемещается вдоль длины заготовки нежёсткого вала и в каждой фиксированной точке Z_i оказывает давление на заготовку. Также в программном модуле «Регулирование скорости резания по II контуру» можно варьировать следующими переменными: длиной заготовки вала L ; диаметром заготовки вала d ; шагом q ; припуском t (глубина резания); коэффициентом учитывающего свойства обрабатываемого материала C_{Py} ; подачей режущего инструмента S ; коэффициентом поправочным, который учитывает влияние главного угла в плане режущего инструмента K_{τ} ; коэффициентом поправочным, который учитывает влияние переднего

угла режущего инструмента K_{α} ; коэффициентом поправочным, который учитывает влияние угла наклона главного лезвия режущего инструмента K_{β} ; коэффициентом поправочным, который учитывает влияние качества обрабатываемого материала на силовые зависимости K_{α} и определить общий поправочный коэффициент K_p ; задавать начальные значения силы резания P_y и начальное значение скорости резания V . Варьирование переменными позволяет на стадии компьютерного эксперимента отобразить изменение динамики в виде графика значений скорости резания для стабильных изгибов по всей длине нежёсткого вала и зависимость радиальной силы резания P_y от V , а также визуально отобразить, как избежать различных ошибок, которые могут возникнуть в процессе механической обработки нежёстких деталей типа тел вращения на токарно-винторезном станке за один проход.

Ключевые слова: скорость резания, сила резания, механическая обработка, прогиб вала, алгоритм задачи, схема, программный модуль, второй контур.

Information about autor:

Shakenova Zhamila Nauryzbaevna, Master of technical sciences (Eng.), senior lecturer, Kazakh Automobile and Road Institute named after L.B. Goncharova, Almaty, Kazakhstan; milya_scorpion@mail.ru; <https://orcid.org/0000-0002-7801-4619>

REFERENCES

- [1] Shakenova Zh.N., Karpekov R.K. (2017) Methods of processing non-rigid shafts using an automatic (adaptive control) system. Journal Bulletin of the Kazakh National Research University named after K.I. Satpayev. N 4 (122). Almaty: KazRTU, 2017. P. 385-388 (in Russ.).
- [2] Aleksandrov A.V. (2003) Resistance of materials. The textbook for higher education institutions. M., Russia. ISBN: 5-06-003732-0.
- [3] Shakenova Zh.N., Muslimov A.P. (2017) Development of mathematical model of deflection of soft shaft during cutting // News of the Kyrgyz State Technical University named after I. Razzakov. Theoretical and applied scientific and technical journal. N 2 (42). Bishkek: Publishing Center "Teknik", 2017. P. 82-87 (in Russ.).
- [4] Askarov E.S. (2015) Engineering Technology. Training guide. Almaty, Kazakhstan. ISBN: 978-601-225-769-4.
- [5] Kosilova A.G., Meshcheryakov R.K. (1985) Reference book by the technologist-mechanician. M., Russia, 1985 (in Russ.).
- [6] State standard 19.701-90. Interstate standard. Unified system of program documentation. M., Russia, 2010 (in Russ.).
- [7] Kultin N.B. (2011) Basics of Programming Delphi XE. Saint Petersburg, Russia. ISBN: 978-5-9775-0683-0.
- [8] Flenov M.E. (2011) Bible Delphi. Saint Petersburg, Russia. ISBN: 978-5-9775-0667-0.