

УДК 621.9.06; 621.7.07

МИНИМАЛЬНАЯ ЖЕСТКОСТЬ СТАНОЧНОГО ПРИСПОСОБЛЕНИЯ ПРИ ОБЕСПЕЧЕНИИ ТРЕБУЕМОЙ ШЕРОХОВАТОСТИ ОБРАБАТЫВАЕМОЙ ПОВЕРХНОСТИ ЗАГОТОВКИ

Ерохин В.В.

Брянский государственный университет имени академика И.Г. Петровского

В статье рассматривается методика расчета оптимальных режимов обработки рабочих поверхностей деталей станочных приспособлений. Представлен экспертный параметр качества, который позволяет рассчитать дискретные значения параметров качества поверхностей деталей станочных приспособлений. Показана математическая формализация по нахождению минимальной жесткости станочного приспособления по заданным высотным параметрам шероховатости обрабатываемой поверхности заготовки. Указанные в статье методики позволяют проектировать станочные приспособления и другие изделия технологической оснастки с минимальными затратами на их изготовление.

Ключевые слова: Станочные приспособления, качество, точность, производительность обработки, эксплуатационные свойства.

Параметрами качества станочного приспособления являются его точность и надежность. Точность станочного приспособления (СП) определяет выполнение заданных параметров точности размеров, отклонений формы и расположения, волнистости и шероховатости обрабатываемых поверхностей заготовки. Точность и надежность СП обуславливается значениями параметров качества, назначенных на детали СП в зависимости от требуемых показателей эксплуатационных свойств (ЭС) СП.

Выбор методов и расчет оптимальных режимов обработки рабочих поверхностей деталей СП при обеспечении совокупности параметров качества этих поверхностей является многокритериальной задачей. Решение этой задачи представлено на рис. 1. Методика решения заключается в следующем [2].

1. В блоке 1 (рис. 1) задаются: методы обработки поверхностей заготовки; допуски и средняя экономическая точность выполнения технологических размеров обрабатываемой заготовки; параметры качества обрабатываемых поверхностей заготовки – параметры шероховатости (Ra , Rz , R_{max} , Sm), волнистости (Wz , Sw), допуски формы и расположения.

2. В блоке 2 (рис. 1) задаются: схема и силы закрепления; предельные передаваемые нагрузки от СП к обрабатываемой заготовке и от деталей к деталям СП; допустимые параметры виброустойчивости (динамический коэффициент трения, амплитуда колебаний при резонансном режиме); межремонтный период эксплуатации СП [1].

3. На основе данных блоков 1 и 2 в блоке 3 (рис. 1) выбираются лимитирующие ЭС СП, определяющие требуемые функциональность СП, параметры точности и надежности СП.

4. Для лимитирующих ЭС СП в блоке 4 в зависимости от требуемой надежности и точности функционирования СП из базы данных выбираются требуемые величины параметров качества (например, H_{max} , Wz , Wp , Sw , Ra , Rz , R_{max} , Rp , tp , Sm , S , σ_b , σ_m , E , μ , HB , $D_{кр}$, ρ_d , $\sigma_{ост}$, $h_{\sigma 0}$, $H_{\mu 0}$, h_n), оптимальные значения которых необходимо определить. Здесь σ_b – предел прочности на разрыв; σ_m – предел текучести материала; E – модуль упругости первого рода; μ – коэффициент Пуассона; HB – твердость материала; $D_{кр}$ – размер кристаллита (зерна) материала; ρ_d – плотность дислокационных петель материала; $\sigma_{ост}$ – остаточные напряжения поверхностного слоя; $h_{\sigma 0}$ – глубина залегания остаточных напряжений; $H_{\mu 0}$ – микротвердость поверхностного слоя; h_n – глубина наклепанного слоя [4].

5. В блоке 5 производится выбор материала деталей СП и расчет оптимальных параметров качества их рабочих поверхностей. Этот расчет осуществляется в зависимости от заданных в блоках 1 и 2 значений параметров качества обрабатываемых поверхностей заготовки, надежности закрепления и долговечности СП. Критериями оптимальности расчета являются минимальная себестоимость и максимальная производительность обеспечения параметров качества рабочих поверхностей деталей СП.

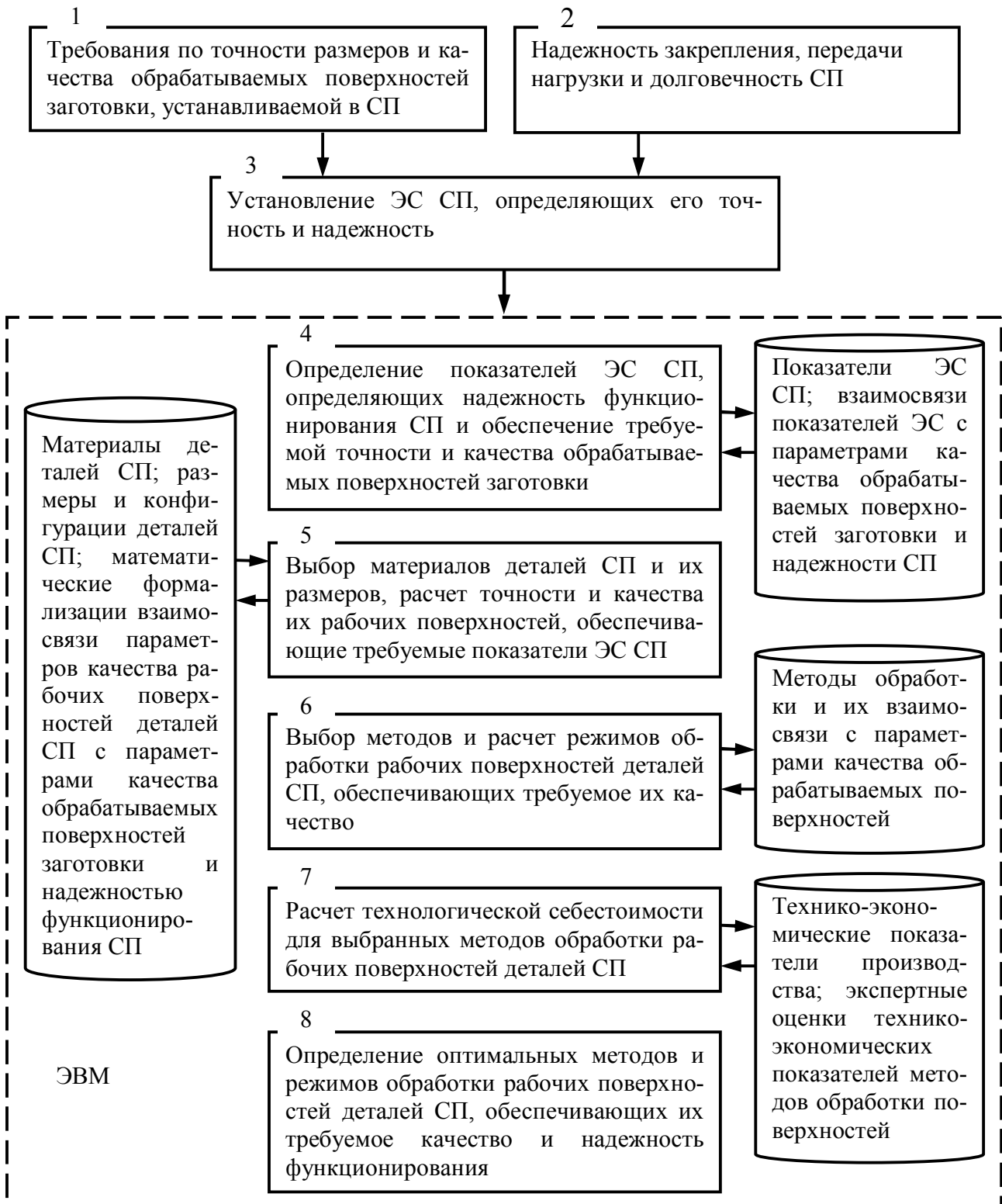


Рис. 1. Блок-схема обеспечения параметров качества СП

В этом случае вводится экспертный параметр оптимальности, определяемый как

$$Kx_{ji} = (Tx_j \cdot Cx_j)_i,$$

где Kx_{ji} – экспертный параметр оптимальности по проектному параметру x_j (например, $x_1 = Ra$, $x_2 = Wz$ и т.д.), руб.·ч; Tx_j – время обеспечения проектного параметра детали приспособления, ч; Cx_j – себестоимость обеспечения проектного параметра детали приспособления, руб.; i – значение дискретно изменяемого проектного параметра x_j .

Принимая вид зависимости между проектными параметрами качества СП и трудовыми затратами, необходимыми для их обеспечения, экспоненциальный (рис. 2), экспертный параметр оптимальности имеет вид [5]

$$Kx_{ji} = [Kx_{j.эм1} \ln(x_{j.эм1}/x_{j.эм2}) + (Kx_{j.эм1} - Kx_{j.эм2}) \ln(x_{ji}/x_{j.эм2})] / \ln(x_{j.эм1}/x_{j.эм2}),$$

где $Kx_{j.эм1}$, $Kx_{j.эм2}$ – экспертные параметры оптимальности по проектному эталонному параметру x_j соответственно при первом и втором эталонных значениях x_j (определяются из условий конкретного производства изготовления приспособлений или по методу экспертных оценок) руб. ·ч; $x_{j.эм1}$, $x_{j.эм2}$ – эталонные значения проектных параметров по которым определяются соответствующие им значения Tx_j и Cx_j , тем самым и $Kx_{j.эм1}$, $Kx_{j.эм2}$; x_{ji} – проектный параметр качества приспособления при каком-либо значении i .

Коэффициенты $a_1, b_1, a_2, b_2, \dots, a_i, b_i$ (рис. 2) являются заданными. Они определяются для соответствующих проектных параметров либо из конкретных производственных условий их обеспечения, либо по экспертным оценкам для абстрактных производственных условий.

Оптимальные параметры определяются по следующей методике.

А. Формируются дискретные ряды параметров качества рабочих поверхностей деталей СП (например, числовые параметры Ra и Sm изменяются по ряду R10, параметры $HV, \sigma_m, \sigma_b, \sigma_{ост}, D_{кр}, \rho_d$ изменяются по ряду R80).

Б. Проводится ранжирование параметров x_{ji} относительно возрастающего параметра Kx_{ji} в вектор-столбец.

В. Методом рекурсивного перебора, начиная с элемента вектора-столбца, имеющего наименьшее значение параметра Kx_{ji} , определяются первые (оптимальные) значения параметров x_{ji} , которые удовлетворяют требованиям точности и надежности СП.

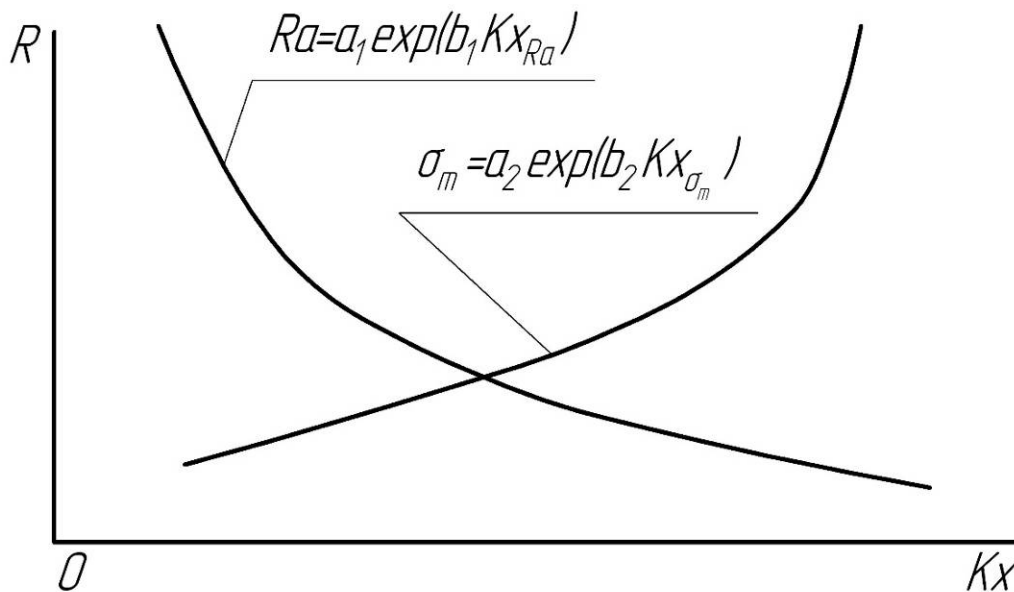


Рис. 2. Взаимосвязь проектных параметров качества СП с экспертными параметрами оптимальности (R – какой-либо проектный параметр качества СП (здесь Ra ; σ_m); a_1, a_2, b_1, b_2 – коэффициенты)

6. По рассчитанным значениям параметров качества рабочих поверхностей деталей СП в блоке 6 (рис. 1) выбираются методы и рассчитываются режимы обработки на эти поверхности. Данные для осуществления этого расчета берутся из соответствующей базы данных (рис. 1). В ней содержатся математические формализации, которые определяют для каждого метода обработки взаимосвязи между режимами резания и получаемыми параметрами качества обрабатываемых поверхностей [6].

7. Технологическая себестоимость для выбранных методов обработки рабочих поверхностей деталей СП определяется в блоке 7. Для известной производственной структуры предприятия она определяется по общепринятым методикам. В случае проектирования СП

для абстрактной производственной структуры, так же, как и в блоке 5, необходимо использовать ранжирование методов и режимов обработки поверхностей по минимуму себестоимости на основе экспертных оценок.

8. На основе данных по технологической себестоимости (блок 7), в блоке 8 определяются оптимальные методы и режимы обработки рабочих поверхностей деталей СП, обеспечивающих их требуемое качество и надежность функционирования.

При обработке поверхностей заготовки формируется их микропрофиль, который определяется параметрами шероховатости поверхности. На параметры шероховатости влияют колебания заготовки, приспособления, станка и инструмента. За базовые параметры шероховатости возьмем два параметра: высотный – среднее арифметическое отклонение профиля (Ra); шаговый – средний шаг неровностей профиля (S_m). Параметр шероховатости Ra обрабатываемой поверхности заготовки можно определить по следующей формуле

$$Ra = (Ra_c^2 + Ra_n^2 + Ra_u^2 + Ra_z^2)^{0,5} \text{ (мкм)},$$

где Ra_c, Ra_n, Ra_u, Ra_z – составляющие от среднего арифметического отклонения профиля поверхности Ra , зависящие от колебаний соответственно станка, приспособления, инструмента и заготовки, мкм.

Составляющая Ra_n определяется одним из двух методами. Первый метод заключается в том, что известно средняя экономическая точность процесса обработки по параметру шероховатости Ra :

$$Ra_n \leq Ra - \omega_{cp.э.ш}, \text{ мкм},$$

где $\omega_{cp.э.ш}$ – средняя экономическая точность формирования высотного параметра шероховатости Ra резанием поверхности заготовки, учитывающая состояния (точность, динамическую жесткость) станка, инструмента и заготовки, мкм.

Второй метод заключается в анализе вероятностей формирования высотного параметра шероховатости. Допустим, что на параметр шероховатости влияют различные факторы с равной вероятностью. В этом случае, приводя эти факторы к составляющей технологической системы, т.е. к станку, приспособлению, инструменту и заготовки, можно определить долю составляющих шероховатости Ra . Так на параметры шероховатости в основном влияют жесткость элементов технологической системы и геометрия режущего инструмента, значит на параметр Ra влияют пять факторов, два из которых относятся к инструменту. Это значит, что параметр Ra_n можно определить по следующей укрупненной и приближенной формуле

$$Ra_n \leq 0,2Ra \text{ (мкм)}.$$

Шаговый параметр шероховатости S_m определяется главной или несущей частотой колебания какого-либо и только одного элемента технологической системы, т.е. либо станка, либо приспособления, либо инструмента, либо заготовки. Для определения проектных параметров станочного приспособления необходимо задаться параметром S_m , численное значение которого определяется функциональным назначением поверхности детали.

Зная параметр Ra_n и S_m , можно определить гармоническую функцию колебаний обрабатываемой поверхности заготовки в следующем виде

$$q_{ш} = Ra_n \sin(\omega t) \text{ (мкм)}, \quad (1)$$

где $\omega = 2 \cdot \pi 1000V/S_m$ – угловая частота колебания заготовки в зоне резания, формирующая шероховатость поверхности, c^{-1} ; S_m – средний шаг неровностей профиля, мм; V – скорость резания, м/с; t – координата времени, с.

Для определения влияния параметров приспособления на параметры шероховатости Ra_n и S_m зададимся следующими правилами [7]:

- 1) заготовка абсолютно твердое тело;
- 2) если неизвестно направление силы резания, то ее направление задается наихудшим вариантом колебания приспособления, т.е. она должна быть направлена на отрыв заготовки от опор приспособления по приоритету наихудшего состояния колебания приспособления – от опорной базы, предотвращающей поворот заготовки, опорной базы, предотвращающей линейное перемещение заготовки, направляющей базы, установочной базы, двойной направляющей базы.

Уравнение колебания твердого тела описывается уравнением

$$\overline{A} \cdot \ddot{q} + \overline{C} \cdot q = \overline{Q}(t), \quad (2)$$

где $\overline{A} = \begin{pmatrix} M & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & M & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & M & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & A & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & B & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & C \end{pmatrix}$ – матрица коэффициентов сил инерции заготовки;

M – масса обрабатываемой заготовки, а также плавающей поводковой части поводкового устройства, если он имеется; A, B, C – главные центральные моменты инерции заготовки, а также плавающей поводковой части поводкового устройства по осям X, Y, Z , если он имеется; $q \{q_1=\xi, q_2=\eta, q_3=\zeta, q_4=\theta, q_5=\psi, q_6=\varphi\}$ – вектор-столбец, характеризующий перемещения технологических баз (ξ, η, ζ – перемещения упругого элемента соответственно по осям неподвижной системы координат $O\xi\eta\zeta$; θ, ψ, φ – корабельные углы Эйлера, предложенные акад. А.Н. Крыловым для упрощения определения направляющих косинусов при малых колебаниях; \overline{C} – матрица коэффициентов динамической жесткости опорных и зажимных деталей в зонах их контакта с заготовкой; $\overline{Q}(t)$ – вектор-столбец, характеризующий действия внешних сил на заготовку.

Если принять гармонический характер изменения действия внешних сил, т.е. $Q_x \sin \omega t, Q_y \sin \omega t$ и $Q_z \sin \omega t$ (Q_x, Q_y, Q_z – составляющие внешней силы, действующие в направлениях соответственно осей X, Y, Z), и подставить уравнение (1) в уравнение (2), тогда получим значения минимальных упругих жесткостей опорных и зажимных деталей приспособления в зоне контакта с заготовкой [8]:

$$\begin{aligned} \sum_i j_{i,x} &= Q_x / Ra_n + M\omega^2; \\ \sum_i j_{i,y} &= Q_y / Ra_n + M\omega^2; \\ \sum_i j_{i,z} &= Q_z / Ra_n + M\omega^2, \end{aligned} \quad (3)$$

где $j_{i,x}, j_{i,y}, j_{i,z}$ – упругие составляющие жесткости опорных и зажимных деталей, а также подводимых опор соответственно в направлении осей X, Y, Z , Н/м.

В формуле (3) размерность параметра Ra_n берется в метрах.

Однако жесткость опорных и зажимных деталей станочного приспособления в зоне контакта их с заготовкой не может быть больше контактной жесткости, обусловленная допустимым давлением на опору, равным $0,2\sigma_m$ (σ_m – условный предел текучести материала установочной опоры или прихвата). В случае, если это условие не соблюдается необходимо увеличить площадь контакта опор или дополнительно ввести в конструкцию приспособления подводимые опоры или уменьшить внешние силы (силы резания).

Например, при фрезеровании плоскости заготовки из стали 45 (термообработка – улучшение) с изменяющимися силами резания $Q_x = 800$ Н, $Q_z = 1100$ Н, $Q_y = 900$ Н, необходимо получить параметры шероховатости поверхности $Ra_{1,2}, S_m = 0,12$ мм в направлении оси Z . Параметр $Ra_n = 0,2Ra = 0,2 \cdot 1,2 = 0,24$ мкм. Масса заготовки $M = 0,5$ кг. Скорость резания фрезой с режущими пластинами из твердого сплава составляет 120 м/мин. В этом случае

$$\begin{aligned} \omega &= 2 \cdot \pi 1000 V / S_m = 2 \cdot 3,14 \cdot 1000 \cdot 120 / (60 \cdot 0,12) = 104667 \text{ с}^{-1}. \\ \sum_i j_{i,z} &= 1100 / (0,24 \cdot 10^{-6}) + 0,5 \cdot (104667)^2 = 10060923778 \text{ Н/м} = 10061 \text{ Н/мкм}. \end{aligned}$$

Упругая составляющая контактной жесткости стыка заготовки с опорами, изготовленными по ГОСТ 13440-68, составляет

$$j_{км} = 4280000 \text{ Н/мкм (давление на опору 1 МПа);}$$
$$j_{км} = 998000 \text{ Н/мкм (давление на опору 5 МПа);}$$
$$j_{км} = 533000 \text{ Н/мкм (давление на опору 10 МПа);}$$
$$j_{км} = 284800 \text{ Н/мкм (давление на опору 20 МПа).}$$

Однако следует учитывать, что СП состоит из множества соединенных деталей. Это обуславливает уменьшение общей жесткости соединений деталей СП, т.к. детали СП соединены последовательно относительно силового замкнутого поля [3].

Из анализа вышеприведенных расчетов можно сделать вывод: для обеспечения требуемой контактной жесткости совокупности поверхностей деталей СП относительно обеспечения на обрабатываемых поверхностях заготовки параметра шероховатости Ra необходимо по возможности снижать скорость резания и силу резания. Снижение скорости резания обуславливает уменьшение как производительности обработки, так и параметров шероховатости обрабатываемых поверхностей заготовки. Уменьшение силы резания приводит к повышению параметров качества обрабатываемых поверхностей резанием со снижением производительности обработки.

Также следует учитывать, что при чистовых операциях обработки поверхностей заготовки, когда глубина резания и силы резания небольшие, жесткость СП должна быть больше жесткости СП, используемого на технологических операциях, связанных с большими усилиями резания. Это обусловлено повышенными частотами колебаний СП, вызванных силами резания материала заготовки.

Из анализа формул (3) видно, что первоначально необходимо управлять площадью контакта заготовки с опорными и зажимными деталями СП, вторым вариантом может быть изменение силы резания и последним изменяемым параметром может быть снижение скорости резания.

Список литературы

1. Ильицкий, В.Б. Поводковая технологическая оснастка / В.Б. Ильицкий, Ю.А. Малахов, В.В. Ерохин. – Брянск: БГТУ, 1999. – 184 с.
2. Ерохин, В.В. Обеспечение качества станочных приспособлений. Дис. ... докт. техн. наук. – Брянск. 2007. – 412 с.
3. Ерохин, В.В. Динамический эффективный коэффициент трения при вибрации станочных приспособлений / В.В. Ерохин // Вестник машиностроения. – 2006. - №11. – С. 45-48.
4. Ерохин, В.В. Обеспечение параметров качества станочных приспособлений / В.В. Ерохин // Вестник Брянского государственного технического университета. – 2007. - №2. – С. 16-19.
5. Ерохин, В.В. Производительность обработки и экономическая эффективность применения технологической оснастки с улучшенными эксплуатационными свойствами / В.В. Ерохин, Д.А. Погonyшева, И.Г. Степченко // Вестник Брянского государственного университета. – 2013. – № 3. – С. 21-24.
6. Ерохин, В.В. Систематизация станочных приспособлений и методология определения их проектных параметров и эксплуатационных свойств / В.В. Ерохин // Сборка в машиностроении, приборостроении. – 2014. - №4. – С. 14-19.
7. Ерохин, В.В. Проектирование виброустойчивой поводковой технологической оснастки / В.В. Ерохин // Вестник машиностроения. – 2015. - №1. – С. 36-37.
8. Ерохин, В.В. Основные аспекты проектирования станочных приспособлений / В.В. Ерохин // Научно-технический вестник Брянского государственного университета. – 2016. - №1. – С. 11-17.

Сведения об авторе

Ерохин Виктор Викторович - доктор технических наук, доцент, профессор кафедры «Автоматизированные информационные системы и технологии» ФГБОУ ВО «Брянский государственный университет имени академика И.Г. Петровского», erohinv@mail.ru.

THE MINIMUM STIFFNESS OF MACHINE TOOLS FOR ENSURING THE DESIRED ROUGHNESS OF THE MACHINED SURFACE OF THE WORKPIECE

Erokhin V.V.

Academician I.G. Petrovskii Bryansk State University

In the article the method of calculating the optimum modes of processing of working surfaces of machine tool parts. Submitted by the expert quality parameter, which allows you to calculate the discrete values of machine tool surfaces quality parameters details. It is shown that mathematical formalization of finding the minimum stiffness of machine tools on the set altitude parameters treated workpiece surface roughness. These techniques allow the article to design the machine accessories and other items of industrial equipment with minimal cost of their production.

Keywords: *machine retaining device, quality, accuracy, processing capacity, operational properties.*

References

1. Ilitsky V.B., Malakhov Yu.A., Erokhin V.V. *Povodkovaya tekhnologicheskaya osnastka* [Machine-tool adaptations]. Bryansk, BGTU, 1999. 184 p.
2. Erokhin V.V. Ensuring the quality machine tool adaptations. Doct. Diss. (Engineering). Bryansk. 2007. 412 p.
3. Erokhin V.V. Dynamic effective coefficient of friction vibration machine tool accessories, *Russian Engineering Research*, 2006, No.11, pp. 45-48.
4. Erokhin V.V. Maintenance of parameters of quality surfaces of adaptations for machine tool, *Vestnik Bryanskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta*, 2007, No.2, pp. 16-19.
5. Erokhin V.V., Pogonysheva D.A., Stepchenko I.G. Performance handling and economic efficiency of the production tools with improved performance characteristics, *Vestnik Bryanskogo gosudarstvennogo universiteta*, 2013, No.3, pp. 21-24.
6. Erokhin V.V. Systematization of machine adaptations and methodology of determination of their design parameters and operational properties, *Sborka v mashinostroenii, priborostroenii*, 2014, No.4, pp. 14-19.
7. Erokhin V.V. Design of vibration-proof industrial equipment, *Russian Engineering Research*, 2015, No.1, pp. 36-37.
8. Erokhin V.V. Basic aspects design of machine-tool adaptations, *Nauchno-tekhnicheskiy vestnik Bryanskogo gosudarstvennogo universiteta*, 2016, No.1, pp. 11-17.

Author' information

Viktor V. Erokhin - Doctor of Technical Sciences, Professor at Academician I.G. Petrovskii Bryansk State University, erohinvv@mail.ru.