

ТЕХНОЛОГИЯ МАШИНОСТРОЕНИЯ

DOI: 10.26730/1999-4125-2020-4-9-17

УДК 621.91.01

МЕТОДИКА ПАРАМЕТРИЧЕСКОЙ ОПТИМИЗАЦИИ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ ПРИ ОБЕСПЕЧЕНИИ ХАРАКТЕРИСТИК ПОВЕРХНОСТНОГО СЛОЯ ДЕТАЛЕЙ

METHOD OF PARAMETRIC OPTIMIZATION OF TECHNOLOGICAL PROCESSES IN PROVIDING CHARACTERISTICS OF THE SURFACE LAYER OF PARTS

Клепцов Александр Алексеевич,
канд. техн. наук, доцент, e-mail: kaa.tma@kuzstu.ru
Alexander A. Kleptsov, C. Sc. In Engineering
Клепцова Лиля Николаевна,
канд. экон. наук, доцент
Lily N. Kleptsova, C. Sc. In Economy

Кузбасский государственный технический университет имени Т.Ф. Горбачева, 650000, Россия,
г. Кемерово, ул. Весенняя, 28
T. F. Gorbachev Kuzbass State Technical University, 28, Vesennyaya St., Kemerovo, 650000, Russian Federation

Аннотация:

При обработке деталей основное внимание, как правило, уделяется достижению точности, тогда как другие показатели качества, такие как характеристики состояния поверхностного слоя деталей, определяющие их износостойкость и надежность, остаются без внимания. Для получения деталей, наиболее полно отвечающих своему служебному назначению, необходимо не только стремиться к достижению заданной точности, но и обеспечивать определенное качество поверхностного слоя.

При изготовлении любой детали существует несколько вариантов технологического процесса, обеспечивающих требуемую точность и качество поверхностного слоя. В этой связи актуальной задачей технологии машиностроения является оптимизация технологических процессов по всем этапам их разработки, в частности, параметрическая оптимизация.

В статье предложена методика оптимизации технологических процессов механической обработки деталей, позволяющая назначить оптимальные по себестоимости режимы обработки деталей, обеспечивающие заданную точность обработки деталей, шероховатость и физико-механические характеристики качества их поверхностей. Обосновано использование технологической себестоимости в качестве критерия оптимизации.

Для реализации методики разработаны алгоритм и программное обеспечение, позволяющие снизить время проектирования технологических процессов и себестоимость обработки деталей и повысить объективность технического нормирования.

Приведен вариант использования предложенной методики при нормировании технологического процесса детали типа «тело вращения».

Ключевые слова: технологический процесс, оптимизация, точность, шероховатость, себестоимость, критерий, ограничения, режим обработки.

Abstract:

In machining parts, the main attention is usually paid to achieving accuracy, while other quality indicators, such as characteristics of the surface layer of the parts that determine their wear resistance and reliability, are ignored. To obtain the details that best meet their official appointment, it is necessary to strive not only to achieve

a specified accuracy, but also to ensure a certain quality of the surface layer.

In the manufacture of any part, there are several variants of technological process that provide the required accuracy and quality of the surface layer. In this regard, an actual task of engineering technology is the optimization of technological processes at all stages of their development, and, in particular, parametric optimization.

The article proposes a methodology for optimizing the technological processes of mechanical processing of parts that allows you to designate the optimal cost modes for processing parts that provide the specified accuracy of processing parts, roughness and physico-mechanical characteristics of the quality of their surfaces. The use of technological cost as a criterion of optimization is substantiated.

To implement the methodology, an algorithm and software have been developed that reduce the design time of technological processes and the cost of processing parts and increase the objectivity of technical regulation.

A variant of the use of the proposed methodology for the rationing of the technological process of a part of the "body of revolution" type is given.

Key words: *technological process, optimization, accuracy, roughness, cost, criteria, limitations, processing mode*

При обеспечении качества и надежности выпускаемых изделий основное внимание, как правило, уделяется достижению точности, тогда как другие показатели качества, такие как характеристики состояния поверхностного слоя деталей, определяющие износостойкость и, следовательно, надежность деталей, зачастую остаются без внимания.

Таким образом, для получения деталей, наиболее полно отвечающих своему служебному назначению, необходимо не только стремиться к достижению заданной точности, но и обеспечивать определенное качество поверхностного слоя.

Задача получения деталей требуемого качества может быть решена несколькими путями, т.е. может существовать несколько вариантов технологического процесса, обеспечивающих требуемую точность и качество поверхностного слоя. В этой связи одной из важных задач технологии машиностроения является оптимизация технологических процессов по всем этапам их разработки, в частности, параметрическая оптимизация.

В настоящее время предложен ряд методик параметрической оптимизации, которые по виду критерия можно отнести к одной из двух групп.

К первой группе относятся методики, использующие технико-экономические критерии – производительность, себестоимость и т.д. [1, 2, 3, 4, 5, 6]. Они позволяют обеспечить заданную точность детали при минимально возможных затратах, но их недостаток заключается в том, что качество поверхностного слоя в них учитывается лишь в виде ограничений по шероховатости поверхности.

Другая группа – это методики, использующие технико-технологические критерии, в том числе и показатели качества поверхностного слоя [7, 8, 9]. Они позволяют обеспечить заданную точность деталей и экстремальные значения параметров качества поверхностного слоя. Но в большинстве случаев экстремальные значения параметров качества поверхностного слоя превышают

значения, требуемые служебным назначением деталей. Кроме того, критерии, используемые в этих методиках, как правило, не учитывают затрат, связанных с изготовлением деталей.

В предлагаемой методике параметрической оптимизации технологических процессов в качестве показателей физико-механического состояния поверхности используются степень упрочнения и глубина упрочненного слоя. Такой выбор диктуется относительной простотой контроля этих параметров по сравнению, например, с внутренними напряжениями в поверхностном слое.

Установлено [1, 10, 11, 12], что состояние поверхности определяется не только на финишных операциях, но в течение всего процесса обработки деталей, т.е. качество поверхностного слоя после обработки или термообработки зависит от состояния поверхности, полученного на предыдущих операциях, в том числе и на черновых. Следовательно, для более полного учета всех факторов, действующих в процессе обработки, математическая модель, используемая при оптимизации технологических процессов, должна учитывать это явление.

При решении задачи оптимизации наиболее важным является вопрос выбора критерия оптимальности принимаемых решений. Установлено [2, 3, 4], что наиболее универсальный критерий эффективности – приведенные затраты на реализацию технологического процесса

$$P_3 = C_n \cdot N + E \cdot K,$$

где C_n – полная себестоимость единицы продукции; N – годовой выпуск изделий; K – капиталовложения (первоначальные затраты); E – коэффициент окупаемости капиталовложений – величина, обратная сроку окупаемости. Они и должны быть приняты в качестве критерия оптимальности. Доказано [2, 3], что параметрическая оптимизация по критерию приведенных затрат дает те же значения технологических параметров, что и параметрическая оптимизация по критерию

себестоимости.

Таким образом, критерии структурной оптимизации P_3 и параметрической оптимизации C_n взаимно непротиворечивы. Кроме того, чтобы рассчитать приведенные затраты P_3 , необходимо распределить полную себестоимость единицы продукции C_n . Поскольку в состав полной себестоимости входят как затраты, зависящие от технологии изготовления деталей, так и не зависящие от нее, наиболее целесообразным в качестве критерия оптимальности представляется использование так называемой технологической себестоимости – части себестоимости, зависящей от технологии изготовления изделий.

Поэтому в предлагаемой методике параметрической оптимизации технологических процессов в качестве критерия оптимальности принята суммарная технологическая себестоимость группы переходов обработки одной поверхности.

Целевая функция, учитывающая процесс достижения заданного качества деталей, в частности, их точности [2]:

$$\sum_{m=1}^M C_m \rightarrow \min,$$

где

$$C_m = a_{\text{снр } m} \cdot t_{\text{шт } m} + [(1 + \lambda_{\text{см}}) / Q_{\tau m}] \cdot B_{\text{шт } m};$$

$a_{\text{снр } m}$ – суммарная норма затрат на заработную плату рабочего, эксплуатацию оборудования и приспособлений; $B_{\text{шт } m}$ – расходы по эксплуатации кромки инструмента за период стойкости.

Ограничивая поставленную задачу разработкой методики оптимизации группы переходов обработки определенной поверхности, положим, что в общем случае имеется группа M переходов с номерами m от 1 до M . Пусть при данных значениях допуска на размеры заготовки T_0 средней высоты микронеровностей поверхности заготовки Rz_0 , погрешности формы заготовки ρ_0 , степени упрочнения поверхностного слоя заготовки U_0 , общего припуска \bar{Z} , размера партии Q необходимо обеспечить допуск на конечный размер T , шероховатость поверхности детали Rz_M , погрешность формы детали ρ_M , степень и глубину упрочнения поверхностного слоя детали U_M и h_M , фонд рабочего времени обработки деталей T_Q .

Управляющими технологическими параметрами (независимыми переменными) являются: τ_m – период стойкости кромки режущего инструмента; V_m – скорость резания; S_m – подача; Z_m – среднее значение припуска на обработку на данном переходе; i_m – число рабочих ходов на m -переходе; T_m – допуск на межоперационный размер, полученный на m -переходе.

Фазовыми технологическими параметрами являются: ω_m – величина поля рассеивания размеров, полученная на m -переходе; Rz_m – шероховатость поверхности; ρ_m – погрешность

формы обрабатываемой поверхности; U_m – степень упрочнения и h_m – глубина упрочненного слоя обрабатываемой поверхности на m -переходе.

Уравнения процесса выглядят следующим образом [3, 4, 9, 8, 11, 13, 14, 15]:

$$\omega_m = T_m - T_{\text{см}} - T_{\text{шт } m}; \quad (1)$$

$$Rz_m = Kz_m \cdot (Z_m/i_m)^{fz_m} \cdot S_m^{qz_m} \cdot V_m^{uz_m}; \quad (2)$$

$$U_m = K_{um} \cdot (Z_m/i_m)^{fum} \cdot S_m^{qum} \cdot V_m^{uum} \cdot U_{m-1}^{bum}; \quad (3)$$

$$h_m = K_{hm} \cdot (Z_m/i_m)^{f_{hm}} \cdot S_m^{q_{hm}} \cdot V_m^{u_{hm}} \cdot h_{m-1}^{b_{hm}}; \quad (4)$$

$$\rho_m = \Delta y^{im} \cdot \rho_{m-1}, \quad (5)$$

где $T_{\text{см}}$, $T_{\text{шт } m}$ – части поля допуска, ограничивающие соответственно систематическую погрешность и погрешность измерения; Kz_m , fz_m , qz_m , uz_m – коэффициенты эмпирической зависимости шероховатости поверхности от различных факторов; K_{um} , f_{um} , q_{um} , u_{um} , b_{um} , K_{hm} , f_{hm} , q_{hm} , u_{hm} , b_{hm} – коэффициенты эмпирической зависимости степени и глубины наклепа от различных факторов; $\Delta y = \frac{dy_m}{d(Z_m/i_m)}$ – коэффициент, определяющий копирование погрешностей в процессе обработки. Он определяется жесткостными характеристиками технологической системы.

Так как упругая деформация технологической системы

$$y_m = K_{ym} \cdot (Z_m/\tau_m)^{f_{ym}} \cdot S_m^{q_{ym}} \cdot V_m^{u_{ym}}, \quad (6)$$

то удельное колебание размера динамической настройки при изменении глубины резания Z_m/i_m составит

$$\Delta y = \frac{dy_m}{d(Z_m/i_m)} = f_{ym} \cdot K_{ym} \cdot (Z_m/i_m)^{f_{ym}-1} \cdot S_m^{q_{ym}} \cdot V_m^{u_{ym}}. \quad (7)$$

Здесь f_{ym} , K_{ym} , q_{ym} , u_{ym} – коэффициенты эмпирической зависимости размера динамической настройки от различных факторов.

Все ограничения, принятые в методике, можно разделить на четыре группы:

1. Ограничения по качеству детали:

– ограничения по точности

$$T_{ym} < T_m - T_{\text{см}} - T_{\text{шт } m} - T_{\text{шт } m}; \quad \bar{Z} = \sum_{m=1}^M Z_m; \quad (8, 9)$$

$$\rho_m \leq \rho_{m-1}; \quad \rho_M \leq \rho; \quad (10, 11)$$

$$T_m \leq T_{m-1}; \quad T_M \leq T, \quad (12, 13)$$

показывают необходимость уменьшения погрешностей формы и размеров деталей от перехода к переходу, и на последнем переходе получить заданный размер и величину погрешности формы и погрешности размера детали;

– ограничения по качеству поверхностного слоя

$$Rz_m \leq Rz_{m-1}; \quad Rz_M \leq Rz; \quad (14, 15)$$

$$U_m \leq U_m \leq U_m^*; \quad h_m \leq h_M. \quad (16, 17)$$

Они показывают необходимость уменьшения средней высоты микронеровностей поверхности от перехода к переходу и получения на последнем переходе шероховатости, степени и глубины упрочнения, заданных техническими условиями;

– ограничение, определяющее минимальный припуск, компенсирующий все погрешности заготовки, полученные на предыдущем переходе

$$Z_m - ((T_{m-1} + T_m)/2) > Rz_{m-1} + \sqrt{\rho_{m-1}^2 + \varepsilon_m^2}, \quad (18)$$

где ε_m – погрешность установки детали на данном переходе.

2. Ограничения по технологическим возможностям оборудования:

– по прочности

$$P_m = K_{Pm} \cdot [Z_m + ((T_{m-1} + T_m)/2)/i_m]^{f_{Pm}} \cdot S_m^{q_{Pm}} \cdot V_m^{u_{Pm}} \leq P_{qm}; \quad (19)$$

$$R_m = K_{Rm} \cdot [Z_m + ((T_{m-1} + T_m)/2)/i_m]^{f_{Rm}} \cdot S_m^{q_{Rm}} \cdot V_m^{u_{Rm}} \leq R_{qm}, \quad (20)$$

где P_m – составляющая силы резания в направлении слабого звена механизма подачи; R_m – составляющая силы резания в направлении наибольшей нагрузки на инструмент (при точении P_x и P_z соответственно); P_{qm} и R_{qm} – допустимые значения составляющих силы резания.

– по мощности резания

$$N_m = R_m \cdot V_m / 6120 \cdot \eta_m \leq N_{gm}, \quad (21)$$

где η_m – КПД оборудования; N_{gm} – допустимая величина мощности.

– по износу режущего инструмента

$$H_m = K_{Hm} \cdot (Z_m/i_m)^{f_{Hm}} \cdot S_m^{q_{Hm}} \cdot V_m^{u_{Hm}} \cdot \tau_m^{\omega_{Hm}} \leq H_{gm}; \quad (22)$$

$$H_{3m} = K_{H3m} \cdot (Z_m/i_m)^{f_{H3m}} \cdot S_m^{q_{H3m}} \cdot V_m^{u_{H3m}} \cdot \tau_m^{\omega_{H3m}} \leq H_{3gm}. \quad (23)$$

Здесь H_m и H_{3m} – размерный износ и износ по задней грани инструмента соответственно; H_{gm} и H_{3gm} – допустимые значения размерного износа и износа по задней грани. При точении проходным резцом $H_{3m} = H_m / \tan \alpha$, где α – задний угол.

– по глубине резания

Наибольшая глубина резания ограничивается шириной режущей кромки резца, а наименьшая – условиями стружкообразования:

$$[Z_m - (T_{m-1} + T_m/2)]/i_m \leq t_{g \max}; \quad (24)$$

$$[Z_m - (T_{m-1} + T_m/2)]/i_m > t_{g \min}; \quad (25)$$

где $t_{g \max}$ и $t_{g \min}$ – допустимые значения наибольшей и наименьшей глубины резания соответственно.

3. Ограничение по производительности выглядит следующим образом:

$$\sum_{m=1}^M t_{шт m} \leq T_Q/Q, \quad (26)$$

где $t_{шт}$ – штучное время, связанное с m -переходом:

$$t_{шт m} = \left[b_{\tau m} \cdot \tau_m + b'_m + b_{Hm} \cdot H_m / \left(\frac{T_m - T_{ym} - T_{cm}}{T_{им} - T} \right) \right] / Q_{\tau m} + b''_m;$$

$$b_{\tau m} = (1 + l_{вп m}/L_m) \cdot (1 + \eta_{pm}) \cdot (1 + \lambda_{cm});$$

$$b_{Hm} = (1 + \lambda_{cm}) \cdot t_{om};$$

$$b'_m = (1 + \lambda_{cm}) \cdot (t_{3m} + t_{nm} + t_{om});$$

$$b''_m = t_m \cdot (1 + \eta_{pm});$$

$l_{вп m}$ – длина врезания и перебега режущего инструмента; L_m – длина обрабатываемой поверхности; η_{pm} – коэффициент потерь рабочего времени; λ_{cm} – коэффициент случайной убыли инструмента в результате поломок; t_{nm} – норма времени на размерную настройку и поднастройку технологической системы; t_m – норма времени на смену режущего инструмента.

$$Q_{\tau m} = \tau_m / t_{om}; \quad (27)$$

где $t_{om} = 2\pi \cdot R_{m-1} \cdot L_m \cdot i_m / 10^3 \cdot S_m \cdot V_m$ – основное время на m -переходе; R_{m-1} – радиус детали, полученный на предыдущем переходе.

Эти ограничения обеспечиваются при оперативном планировании производства [2, 6, 8] и, следовательно, могут не включаться в методику параметрической оптимизации технологического процесса партионной механической обработки, выполняемой в условиях серийного производства.

4. Ограничения по организационно-техническим возможностям основных средств:

$$\psi \cdot (1 - \lambda_{cm}) / p_m \cdot t_{шт m} \cdot Q_{\tau m} \leq K_{идт}, \quad (28)$$

где $K_{идт}$ – расход инструмента за отчетный период времени ψ ; p_m – количество переточек, допускаемых инструментом; $K_{идт}$ – допустимый расход инструмента, определяемый возможностями предприятия.

Кроме основных ограничений при построении алгоритма оптимизации используются вспомогательные ограничения, определяющие верхние и нижние границы варьирования оптимизационных параметров:

$$\begin{aligned} \tau_{m*} &\leq \tau_m \leq \tau_m^*; \\ V_{m*} &\leq V_m \leq V_m^*; \\ Z_{m*} &\leq Z_m \leq Z_m^*; \\ S_{m*} &\leq S_m \leq S_m^*; \\ \delta_{m*} &\leq \delta_m \leq \delta_m^*; \\ i_{m*} &\leq i_m \leq i_m^* \end{aligned} \quad (29)$$

Исходные параметры τ_{m*} , τ_m^* , ..., i_{m*} , i_m^* определяются границами применимости соответствующих зависимостей, кинематическими и динамическими возможностями оборудования.

Предложенная математическая модель процесса обработки детали была использована для создания алгоритма параметрической оптимизации механической обработки. Алгоритм решения сформулированной задачи является центральным. В основу алгоритма положен метод случайного поиска [16].

Укрупненная блок-схема алгоритма приведена на рис. 1.

Большое количество исходных параметров, используемых при решении задачи, потребовало создания входного алгоритма. Этот алгоритм позволяет сформировать массив исходных параметров по сравнительно небольшому количеству исходных данных, полученных в результате проектирования технологических

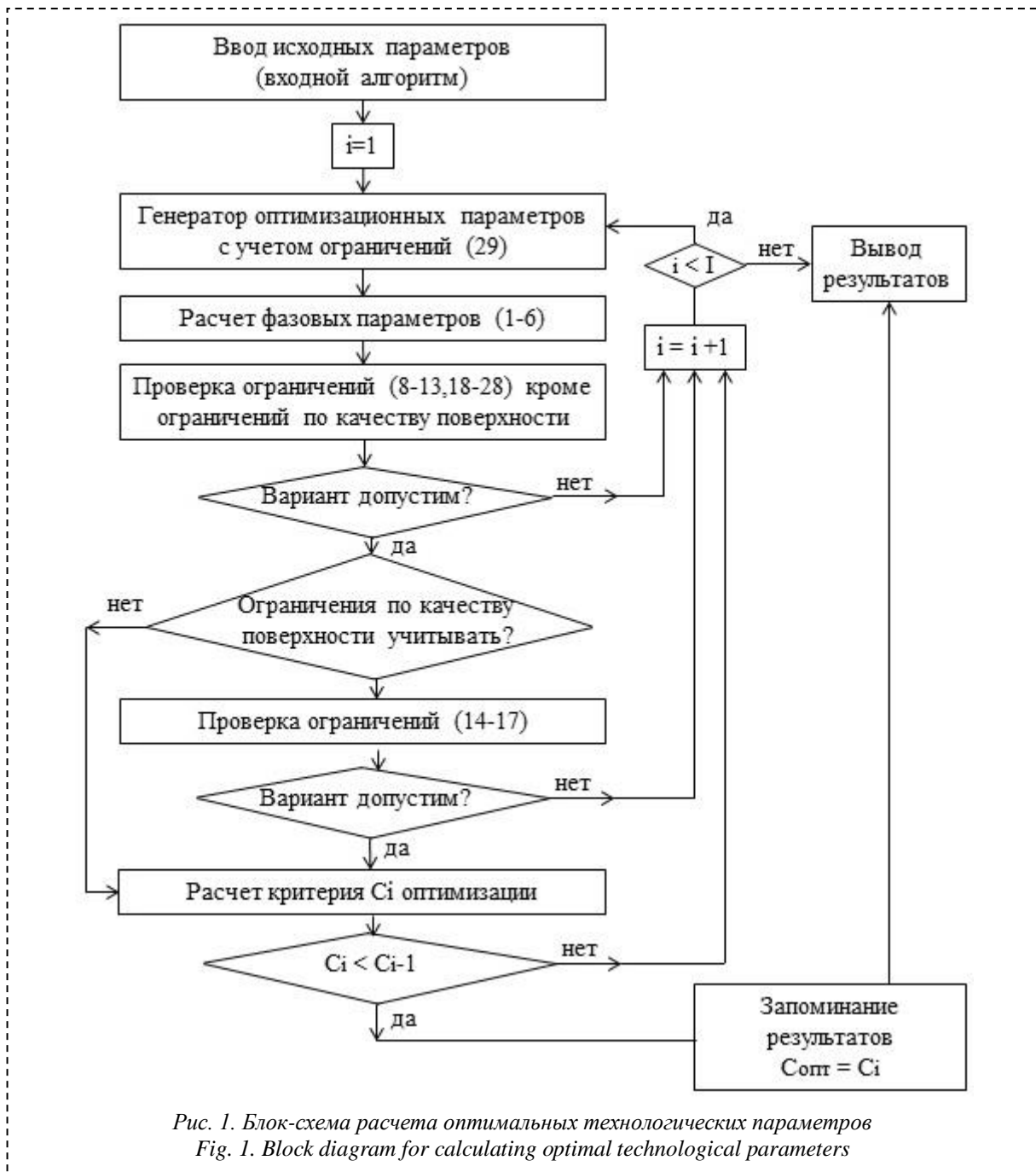


Рис. 1. Блок-схема расчета оптимальных технологических параметров
 Fig. 1. Block diagram for calculating optimal technological parameters

процессов, и тем самым значительно сократить время, необходимое для подготовки данных.

На рис. 1 через i обозначен номер члена случайной последовательности оптимизационных параметров. Генерация случайных значений оптимизационных параметров производится с учетом ограничений (29). Далее по формулам (1-6) рассчитываются параметры процесса, и производится проверка ограничений (8-13) и (18-28). Если ограничения выполняются, в случае необходимости производится проверка ограничений по требуемому качеству поверхностного слоя (14-17) и при выполнении этих условий рассчитывается значение критерия оптимальности C_i . Результаты расчета C_i

сравниваются с предшествующим значением C_{i-1} , и запоминается набор оптимизационных параметров, обеспечивающих меньшее значение критерия. При невыполнении хотя бы одного ограничения производится генерация следующего пакета оптимизационных параметров.

Оптимизационный алгоритм выполняется поочередно для каждой группы переходов обработки каждой поверхности детали.

Кроме того, большое количество исходных параметров, используемых при решении задачи, потребовало создания входного алгоритма. Этот алгоритм позволяет сформировать массив исходных параметров по сравнительно

Таблица 1. Результаты оптимизации по предложенному алгоритму
 Table 1. Optimization results according to the proposed algorithm

Номер операции	Номер перехода	Режим резания				Допуск на размер	Стойкость в количестве деталей, шт.	Штучное время, мин	Размер после обработки, мм
		Скорость, м/мин	Подача мм/об	Глубина резания, мм	Число рабочих ходов				
1	1	177/160	0,26/0,47	3,16/3,50	1/1	0,33/0,26	91/66	3,76/6/31	83,68/83,0
	2	177/170	0,18/0,30	2,76/3,50	1/1	0,29/0,23	103/28		55,48/53,0
2	1	235/218	0,18/0,13	1,84/1,5	1/1	0,1/0,1	114/67	3,82/4,39	80,0/80,0
	2	235/220	0,14/0,20	2,24/1,5	1/1	0,2/0,2	124/58		60,0/60,0

Таблица 2. Характеристики качества поверхностного слоя, получаемые при обработке заготовки на рассчитанных режимах
 Table 2. Characteristics of the quality of the surface layer obtained by processing the workpiece in the calculated modes

Поверхность	Переход	Шероховатость, Rz, мкм	Степень упрочнения U	Глубина упрочненного слоя h, мм	Технологическая себестоимость C, усл. ед.
Вал Ø80 _{-0,1}	1	25,9	1,69/1,83	0,1759	3,518/4,276
	2	19,7	1,45	0,1543	3,510/7,107
					Всего 7,028/11,383
Отверстие Ø60 ^{+0,2}	1	23,5	1,61	0,1703	2,625/3,773
	2	19,1	1,45	0,1624	2,632/4,090
					Всего 5,257/7,863

небольшому количеству исходных данных, полученных в результате проектирования технологических процессов, и тем самым значительно сократить время, необходимое для подготовки данных.

Центральный и входной алгоритмы реализованы в виде программ на языке DTLPHI-6 для ЭВМ.

Ниже приведен пример расчета оптимальных технологических параметров при точении втулки.

Заготовка втулки – поковка, имеет наружный диаметр Ø90_{-0,8}, диаметр отверстия Ø50^{+0,5}, длина заготовки 200±1 мм.

При обработке наружной поверхности втулки необходимо получить величину диаметра Ø80_{-0,1}, среднюю высоту неровностей не более 20 мкм, степень наклепа поверхностного слоя в интервале от 1,4 до 1,5, глубину распространения наклепа не более 0,2 мм, отклонение от цилиндричности поверхности не более 0,01 мм.

При растачивании отверстия необходимо получить Ø60^{+0,2}, среднюю высоту неровностей не более 20 мкм, отклонение от цилиндричности не более 0,01 мм. Физико-механические параметры качества поверхностного слоя при растачивании отверстия не учитывать.

Обработка заготовки ведется по следующему маршруту:

Операция 1

1. Черновое точение наружной поверхности.

2. Черновое растачивание отверстия.

Операция 2

1. Чистовое точение наружной поверхности.

2. Чистовое растачивание отверстия.

Обе операции проводятся на станке мод. 16К20 проходным резцом с механическим креплением твердосплавных пластин Т15К6. Материал детали – сталь 45. Необходимо рассчитать оптимальные режимы обработки партии деталей Q = 350 шт.

Результаты расчетов по предложенному алгоритму приведены в табл. 1. В знаменателе указаны значения параметров режима обработки, принятые по нормативам [Нормативы резания].

В табл. 2 показаны характеристики качества поверхностного слоя, получаемые при обработке заготовки на рассчитанных режимах, а также себестоимость групп переходов обработки каждой поверхности. В знаменателе указана технологическая себестоимость, определенная для нормативных значений режимов резания.

За счет использования оптимальных режимов себестоимость обработки снижается в 1,4-1,5 раза.

Время решения данной задачи на ЭВМ, включая время на подготовку данных, составляет 18-20 минут, тогда как время «ручного» технического нормирования для данного примера – 70-80 минут, т.е. использование разработанного алгоритма повышает производительность технического нормирования в 3,5-5 раз.

Выводы

1. Параметрическая оптимизация технологических процессов обработки деталей в большинстве случаев должна осуществляться комплексно с учетом не только точности обрабатываемых деталей, производительности, стойкости инструмента, но и качества поверхностного слоя. При этом технологическая себестоимость должна быть критерием оптимальности, а шероховатость и физико-механические характеристики поверхностных слоев детали должны учитываться в виде ограничений.

2. Применение методики оптимизации позволит снизить время проектирования технологических процессов и себестоимость обработки деталей и повысить объективность технического нормирования.

3. Предлагаемая методика оптимизации позволяет рассчитать оптимальные по себестоимости режимы обработки деталей, обеспечивающие заданную точность обработки деталей, шероховатость и физико-механические характеристики качества поверхностей.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Обеспечение качества изделий в технологических комплексах / С.А. Чижик [и др.]; под общ. ред. М.Л. Хейфеца. – Минск: Беларуская навука, 2019. – 248 с. – (Технологические комплексы: проектирование, производство, применение). – ISBN 978-985-08-2442-4.
2. Адаптивное управление технологическими процессами (на металлорежущих станках) / Ю.М. Соломенцев, В.Г. Митрофанов, С.П. Протопопов. – М. : Машиностроение, 1980. – 535 с.
3. Кутин А.А., Туркин М.В. Критерий структурной оптимизации производственного процесса изготовления сложных деталей машиностроения. Известия высших учебных заведений. Машиностроение. 2011. №10. С. 72-75.
4. Чубуков А.И., Моисеева Л.Т. Оптимизация технологического процесса по двум критериям при изготовлении детали «втулка». Теоретические и практические аспекты развития современной науки: теория, методология, практика. Сборник статей по материалам II Международной научно-практической конференции. 2020. С. 31-37.
5. Карпов А.В. К вопросу повышения энергетической эффективности технологических процессов обработки резанием. Современные наукоемкие технологии. 2019. №3. С. 43-47.
6. Боршова Л.В. Оптимизация процесса механической обработки деталей сложного профиля. / Боршова Л.В., Пегашкин В.Ф., Миронова М.В. монография / научный редактор В.А. Коротков; Уральский федеральный университет имени первого Президента России Б.Н. Ельцина, Нижнетагильский технологический институт (филиал). Екатеринбург, 2019.
7. Акинъшин Р.Н. Обеспечение качества поверхностного слоя и снижение технологической себестоимости при токарной обработке. Известия Московского государственного технического университета МАМИ. 2014. Т. 2. №1(19). С. 179-184.
8. Ковалев С.П., Шаймарданов М.Ю. Метод учета технологических ограничений при оптимизации топологии изделий машиностроения. Информационные технологии. 2018. Т. 24. №2. С. 75-80.
9. A. Kleptsov, L. Kleptsova Definition of the Parameters of Surface Layer Based on Functionality of Parts (Web of Science) MATEC Web of Conferences 297, 01001 (2019). X International Scientific and Practical Conference «Innovations in Mechanical Engineering» (ISPCIME-2019). Kemerovo, Russia, November 26-29, 2019.
DOI:10.1051/matecconf/201929701001
10. Блюменштейн В.Ю., Смелянский В.М. Механика технологического наследования на стадиях обработки и эксплуатации деталей машин. Монография. М.: Машиностроение-1, 2007. – 400 с.
11. V. Blumenstein, M. Makhlov The Metal Surface Layer Mechanical Condition Transformation in Machining Processes. MATEC Web Conf. Volume 297, 2019. X International Scientific and Practical Conference “Innovations in Mechanical Engineering” (ISPCIME-2019). Article Number 05001. Number of page(s) 7. Section: The Strengthening Technologies and Functional Coverings
DOI:10.1051/matecconf/201929705001

12. Пимонов М.В. Исследование влияния режимов механической обработки на параметры структурно-фазового состояния поверхностного слоя с применением аппарата механики технологического наследования. / Пимонов М.В., Левашова Е.Е., Глинка А.С., Абабков Н.В., Попова Н.А., Конева Н.А. *Фундаментальные проблемы современного материаловедения*. 2018. Т. 15. №4. С. 518-525.
13. Qin Guo, Mulan Wang, Youfeng Xu, Yulin Wang. Minimization of surface roughness and tangential cutting force in whirlwind milling of a large screw. *Measurement*. Volume 152. February 2020. Article 107256. <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0263224119311200>
14. Weiwei Zhang, Kejia Zhuang. Effect of cutting edge microgeometry on surface roughness and white layer in turning AISI 52100 steel. *Procedia CIRP* Volume 872020 Pages 53-58. <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2212827120302055>
15. Rajashree Mallick, Ramanuj Kumar, Amlana Panda, Ashok Kumar Sahoo. Performance characteristics of hardened AISI D2 steel turning: A review. *Materials Today: Proceedings*. Volume 26, Part 22020. Pages 2685-2690. <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2214785320313201>
16. Поварницын И.В. Методы оптимизации. *Инновационное развитие современной науки: проблемы, закономерности, перспективы*. Сборник статей VII Международной научно-практической конференции : в 2 ч. 2018. С. 14-16.

REFERENCES

1. Chizhik S.A., Vitiaz P.A., Heifetz M.L., Borodavko V.I, Prement G.B., Klimenko S.A., Bataev A.A., Blumenstein V.Yu, Vasiliev A.S., Kolmakov A.G., Krechetov A.A., Panin A.V, Chugui Yu.V. Quality assurance of products in technological complexes. Under total. ed. M.L. Kheifets. Minsk. Belaruskaya Navuka [Byelorussian science] 2019. 248 p. [Technological complexes: design, production, application].
2. Solomentsev Yu.M., Mitrofanov V.G., Protopopov S.P. Adaptive control of technological processes (on metal-cutting machines). Moscow. Mashinostroenie [Machine-building]. 1980. 535 p.
3. Kutin A.A., Turkin M.V. A criterion for structural optimization of the production process for the manufacture of complex mechanical engineering parts. [Proceedings of higher educational institutions. Mechanical engineering]. 2011. No. 10. p. 72-75.
4. Chubukov A.I., Moiseeva L.T. Optimization of the technological process by two criteria in the manufacture of the "sleeve" part. [Theoretical and practical aspects of the development of modern science: theory, methodology, practice]. [Collection of articles based on the materials of the II International Scientific and Practical Conference]. 2020.p. 31-37.
5. Karpov A.V. On the issue of increasing the energy efficiency of technological processes of cutting. [Modern high technologies]. 2019. No. 3. p. 43-47.
6. Borshova L.V., Pegashkin V.F., Mironova M.V. Optimization of the process of machining parts of a complex profile. Scientific editor V.A. Korotkov; Ural Federal University named after the first President of Russia B.N. Yeltsin, Nizhny Tagil Technological Institute (branch). Yekaterinburg. 2019.
7. Akinshin R.N. Ensuring the quality of the surface layer and reducing the technological cost when turning. [Bulletin of the Moscow State Technical University MAMI]. 2014. T. 2. No. 1 (19). p. 179-184.
8. Kovalev S.P., Shaimardanov M. Yu. A method of accounting for technological limitations when optimizing the topology of mechanical engineering products. [Information Technology]. 2018. Vol. 24. No. 2. p. 75-80.
9. Kleptsov A.A., Kleptsova L.N. Definition of the Parameters of Surface Layer Based on Functionality of Parts (Web of Science) MATEC Web of Conferences 297. 01001 (2019). X International Scientific and Practical Conference «Innovations in Mechanical Engineering» (ISPCIME-2019). Kemerovo, Russia. November 26-29. 2019.
DOI:10.1051/mateconf/201929701001
10. Blumenstein V. Yu., Smelyansky V.M. Mechanics of technological inheritance at the stages of processing and operation of machine parts. Moscow. Mashinostroenie-1 [Machine-building-1]. 2007. 400 p.
11. Blumenstein V. Yu., Makhalov M.V. The Metal Surface Layer Mechanical Condition Transformation in Machining Processes. MATEC Web Conf. Volume 297. 2019. X International Scientific and Practical Conference «Innovations in Mechanical Engineering» (ISPCIME-2019). Article Number 05001. Number of page (s) 7. Section: The Strengthening Technologies and Functional Coverings
DOI:10.1051/mateconf/201929705001

12. Pimonov M.V. Levashova E.E., Glinka A.S., Ababkov N.V., Popova N.A., Koneva N.A. Investigation of the influence of machining modes on the parameters of the structural-phase state of the surface layer using the apparatus of mechanics of technological inheritance. [Fundamental problems of modern materials science]. 2018.Vol. 15.No.4. p. 518-525.

13. Qin Guo, Mulan Wang, Youfeng Xu, Yulin Wang. Minimization of surface roughness and tangential cutting force in whirlwind milling of a large screw. [Measurement]. Volume 152. February 2020. Article 107256. <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0263224119311200>

14. Weiwei Zhang, Kejia Zhuang. Effect of cutting edge microgeometry on surface roughness and white layer in turning AISI 52100 steel. [Procedia CIRP] Volume 872020 Pages 53-58. <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2212827120302055>

15. Rajashree Mallick, Ramanuj Kumar, Amlana Panda, Ashok Kumar Sahoo. Performance characteristics of hardened AISI D2 steel turning: [A review. Materials Today]. [Proceedings]. Volume 26, Part 22020. Pages 2685-2690. <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2214785320313201>

16. Povarnitsyn I.V. Optimization methods. Innovative development of modern science: problems, patterns, prospects. [Collection of articles of the VII International Scientific and Practical Conference] 2 parts. 2018. p. 14-16.

Поступило в редакцию 12.08.2020
Received 12 August 2020