

Научноёмкие технологии в машиностроении. 2023. №11 (149). С.30-38.  
Science intensive technologies in mechanical engineering. 2023. №11 (149). P.30-38.

Научная статья  
УДК 621.01:658  
doi: 10.30987/2223-4608-2023-30-38

## Многокритериальная оптимизация операционных режимов технологических процессов

Анатолий Васильевич Тотай<sup>1</sup>, д.т.н.  
Максим Николаевич Нагоркин<sup>2</sup>, д.т.н.  
Виталий Сергеевич Селифонов<sup>3</sup>, к.т.н.

<sup>1, 2, 3</sup> Брянский государственный технический университет, Брянск, Россия

<sup>1</sup> totai\_av@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0003-4794-9881>

<sup>2</sup> nagorkin\_mn@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0002-4536-7522>

<sup>3</sup> vitalserg82@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0001-8660-2915>

**Аннотация.** Рассмотрены вопросы, достаточно редко объединяемые в одном небольшом исследовании. Прежде всего, это известная проблема технологического обеспечения заданного качества поверхностного слоя закалённых сталей лезвийным инструментом из сверхтвёрдых материалов и состояние микроклимата рабочих зон металлорежущих станков. Сделана попытка создания математической модели, объединяющей эти две целевые функции. В качестве математического аппарата, позволяющего оптимизировать режимы чистового и тонкого точения, был применён метод линейного программирования, позволивший наглядно с помощью его графического изображения представить картину влияния включённых в модель технических ограничений на оптимальные значения скорости резания и подачи. На основе аналитических исследований получены зависимости образования паров сероводорода в рабочих зонах металлорежущих станков, использующих в качестве смазывающе-охлаждающих жидкостей сульфорезолы различных марок. Теоретически установлено, что наибольшее влияние на интенсивность образования паров сероводорода оказывает температура в зоне резания, на которую в большей степени оказывает скорость точения. В работе даны коэффициенты к эмпирическим зависимостям, позволяющим установить усреднённую температуру в зоне резания при обработке различных сталей, а также высокопрочных чугунов и цветных сплавов. В качестве параметров состояния поверхностного слоя цилиндрических поверхностей принималась шероховатость и коэффициент степени наклёпа, которые в значительной степени определяют долговечность изделий в условиях трения и циклических нагрузжений. Тестирование полученных математических моделей позволило получить оптимальные значения подачи и скорости резания для чистового и тонкого точения закалённых сталей 45 и 65Г.

**Ключевые слова:** линейное программирование, графическая модель, целевая функция, параметры оптимизации

**Для цитирования:** Тотай А.В., Нагоркин М.Н., Селифонов В.С. Многокритериальная оптимизация операционных режимов технологических процессов // Научноёмкие технологии в машиностроении. 2023. № 11 (149). С. 30–38. doi: 10.30987/2223-4608-2023-30-38

## Multiple-criteria optimization of operational modes of technological processes

Anatoly V. Totay<sup>1</sup>, D. Eng.  
Maxim N. Nagorkin<sup>2</sup>, D. Eng.  
Vitaly S. Selifonov<sup>3</sup>, Ph. D. Eng.

<sup>1, 2, 3</sup> Bryansk State Technical University, Bryansk, Russia

<sup>1</sup> totai\_av@mail.ru

<sup>2</sup> nagorkin\_mn@mail.ru

<sup>3</sup> vitalserg82@mail.ru

**Abstract.** The issues that are rarely combined in one small study are viewed. First of all, this is a well-known problem of engineering support of a specified quality of hardened steels surface layer using a blade tool made of superhard materials and the state of microclimate of operating areas of metal-cutting machines. It had a shot at creating a mathematical model that combines these two objective functions. As a mathematical tool that allows optimizing the modes of finishing and fine turning,

*the linear-programming technique was applied, which visualises through its graphic image, a picture of the influence of the engineering constraints included in the model on the optimal values of the cutting speed and feed. On the basis of analytical studies, the dependences of the formation of hydrogen sulfide vapors in the operating areas of metal-cutting machines using sulfofresols of various brands as lubricating and cooling fluids were obtained. Theoretically, it has been established that the maximal influence on the intensity of hydrogen sulfide vapor formation is exerted by the temperature in the cutting zone, which is more effected by the lathe turning speed. The paper presents empirical dependencies ratios that allows finding an average temperature in the cutting zone in the process of various steels treatment, as well as high-strength alloys and non-ferrous alloys. The roughness and the degree of cold work coefficient were taken as parameters of the surface layer condition for cylindrical surfaces, which decisively determine the durability of the products under conditions of friction and cyclic loads. Testing of the obtained mathematical models made it possible to obtain optimal values of feed and cutting speed for finishing and fine turning of hardened steels 45 and 65G.*

**Keywords:** linear programming, graphical model, objective function, optimization parameters

**For citation:** Totay A.V., Nagorkin M.N., Selifonov V.S. Calculation of high-duty cold reduction rollers grinding cycles based on radial force cycle optimization / Science intensive technologies in mechanical engineering. 2023. № 11 (149). P. 30–38. doi: 10.30987/2223-4608-2023-30-38

## Введение

Современное машиностроение и один из главных его компонентов обрабатывающая промышленность в условиях жёсткой конкуренции как на внутреннем, так и на внешнем рынках поставлены перед необходимостью добиваться минимальной себестоимости выпускаемой продукции.

Подобная ситуация предполагает более углубленный подход на основе последних достижений науки к этапу технологической подготовки производства, при котором широко использовались бы не только технико-экономические критерии, но и целевые функции процессов, учитывающие эксплуатационные характеристики изделий и вопросы промышленной экологии.

Попытки создать универсальные математические модели по оптимизации операционных технологических процессов различных методов обработки привели к появлению очень громоздких и не гибких документов, используемых на практике с минимальной эффективностью.

Очевидно, что каждая стадия технологии изготовления изделия, материализованная в конкретный маршрут обработки, имеет свои задачи, реализация которых должна гарантировать достижение конструктивных требований к изделиям.

В настоящее время обеспечение высоких требований по точности и шероховатости поверхностного слоя деталей может быть реализовано большим количеством методов обработки и их последовательностью. В этой

ситуации наиболее рациональным представляется создание математических моделей процессов для каждой отдельной стадии обработки (черновая, получистовая, чистовая и отделочная). В данной работе рассматривается применение оптимизационных моделей при технологической подготовке производства деталей класса валов с конструктивными требованиями по точности шероховатости соответственно: 6, 7 квалитет и  $Ra = 0,16...0,32$  мкм [1 – 3].

Учитывая то обстоятельство, что на первых двух стадиях технологического маршрута снимается, как правило, до 85 % припуска на обработку, то набор технологических ограничений, включаемых в модель процесса, может быть одним и тем же.

Как показывает практика внедрения систем автоматизированного проектирования технологических процессов (ТП), в подавляющем большинстве случаев они применяются на предприятиях, функционирующих в рамках не ниже, чем среднесерийного производства.

Подобная ситуация, очевидно, предполагает и соответствующий уровень организационного и технического обеспечения заготовительного передела. Другими словами, на стадии обработки технологу приходится иметь дело с припусками, соответствующими научно-обоснованным значениям для различных методов получения заготовок.

Это положение даёт возможность исключить ряд технических ограничений из математических моделей без риска некорректного описания того или иного метода обработки [4 – 6]. К таким можно отнести ограничения по

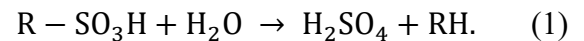
мощности электродвигателя привода главного движения, по прочности и жёсткости режущего инструмента, по прочности механизма подачи станка. Кроме того, можно исключить ограничение по шероховатости поверхности, т. к. данный параметр никогда не контролируется на черновой и получистовой стадии технологического процесса.

При проектировании операционных ТП изготовления деталей класса валов в случаях соотношения длины заготовки к диаметру более семи на усмотрение технолога может быть включено техническое ограничение по жёсткости заготовки. Наряду с перечисленными техническими ограничениями, обеспечивающими выполнение соответствующей технологической операции, в условиях современного обрабатывающего производства нельзя не обращать внимание на экологическую обстановку в механических цехах. Речь в данном случае идёт о микроклимате как непосредственно на рабочих местах станочников, так и в цехе, где могут одновременно работать несколько сотен металлорежущих станков, использующих смазочно-охлаждающие технологические средства (СОТС), большинство которых представляют смазочно-охлаждающие жидкости (СОЖ) [7].

Для предотвращения схватывания и износа режущего инструмента при наиболее тяжёлых температурах и механических нагрузках применяют антизадирные присадки. Чаще

всего это вещества, содержащие хлор, серу, фосфор. Рассмотрим содержание присадки, в которых в зависимости от условий применения масляных СОЖ, содержание серы составляет 0,5...3,0 %, т. к. хлор-фторосодержащие противозадирные присадки менее распространены.

При использовании серосодержащих СОЖ могут образовываться аэрозоли нефтяных масел в присутствии тиолов, сульфидов, сульфокислот. При наличии воды сульфокислоты подвергаются гидролизу:



Таким образом, в воздушном пространстве рабочей зоны металлорежущего станка будут находиться молекулы вышеуказанных соединений. Наибольшую опасность для человека представляет сероводород.

Расчёт дозы сероводорода в рабочей зоне может быть произведён по формуле:

$$D = \int_0^{\infty} C^4(t) dt, \quad (2)$$

где  $D$  – доза сероводорода в рабочей среде;  $C$  – концентрация вещества.

На основании анализа имеющихся экспериментальных данных сформирована таблица влияния величины параметра « $C$ » на клинические симптомы персонала (табл. 1)

## 1. Изменение состояния здоровья при воздействии сероводорода на человека

### 1. Changes in the health state showing how hydrogen sulfide had a bad effect on humans

lgC мг/м <sup>3</sup>	Диапазон значений										
	от -7,0	от -1,5	от 0	от 0,8	от 1,2	от 1,7	от 2,0	от 2,3	от 2,6	от 3,0	от 3,3
Клинические симптомы	— порог восприятия запаха	— обнаружение вкуса	— умеренный запах	— начальное раздражение глаз	— кашель, раздражение глаз	— сильное раздражение глаз, горла	— кашель, раздражение глаз	— выраженный конъюнктивит	— возможная потеря сознания	— быстрая потеря сознания	— немедленная потеря сознания

При резании металлов количество используемой СОЖ может достигать 30...40 л/мин, в результате чего накапливается большое количество серы.

Большую опасность как для человека, так и для окружающей среды представляет воздействие отработанных СОЖ. Доказано, что воздействие на человека СОЖ в условиях производства может привести к возникновению ряда профессиональных заболеваний. Работы отечественных учёных подтверждают тот факт, что аэрозоли нефтяных масел, входящих в состав СОЖ, могут привести к поражению организма вплоть до липоидной пневмонии, изменить сосудистую и нервную системы, вызвать кожно-трофические нарушения (в том числе дерматиты), способствовать снижению иммунобиологической реактивности. Наркотическим действием обладают пары углеводородов, нитрид натрия, триэтанолламин способствует нарушению газового обмена в организме человека и поражению мышц сердца, поражение печени и почек могут вызвать хлоросодержащие присадки, трихлорэтан – источник выделения фосгена и т. д. Кроме того, установлено, что не являются индифферентными для организма человека продукты термической деструкции безвредных компонентов СОЖ, а также возможные новые химические образования в зоне обработки.

В результате испарения отработавших СОЖ происходит загрязнение воздушной

среды. Токсичные компоненты (органические соединения хлора и тяжелых металлов, диоксид серы) распространяются как в производственном помещении, так и в окружающую среду, что приводит к негативному воздействию на персонал и биосферу. Наиболее опасно испарение синтетических масел, а при испарении масел, содержащих полихлордефинылы, образуются еще более токсичные соединения – полихлордибензодиоксины и полихлордибензофураны.

Интенсивность образования сероводорода в рабочей зоне станочника в значительной степени будет зависеть от температуры, сопровождающей процесс резания [8].

Среднюю температуру в зоне резания при точении можно с достаточной для практики точностью определить по зависимости [7]:

$$\theta_{cp} = C_{\vartheta} t^{x_{\vartheta}} S^{y_{\vartheta}} v^{z_{\vartheta}} r^{n_{\vartheta}}, \quad (3)$$

где  $t$  – глубина резания в мм;  $S$  – подача, мм/об;  $v$  – скорость резания, м/мин;  $r$  – радиус при вершине резца, мм;  $C_{\vartheta}$ ,  $x_{\vartheta}$ ,  $y_{\vartheta}$ ,  $z_{\vartheta}$ ,  $n_{\vartheta}$  – коэффициенты.

Значения коэффициентов в формуле приведены в табл. 2. (марки режущих инструментов соответствуют общепринятым рекомендациям).

## 2. Коэффициенты расчётных зависимостей средней температуры в зоне резания при токарной обработке

### 2. Coefficients in the calculated dependences of the average temperature in the cutting zone during turning

Материал заготовки	Коэффициент				
	$C_{\vartheta}$	$x_{\vartheta}$	$y_{\vartheta}$	$z_{\vartheta}$	$n_{\vartheta}$
Среднеуглеродистые стали	96,4	0,080	0,060	0,25	0,070
Легированные стали	118	0,092	0,061	0,28	0,082
Жаропрочные стали	86,7	0,110	0,059	0,31	0,076
Высокопрочные чугуны	134	0,078	0,063	0,26	0,067
Цветные сплавы	121	0,060	0,048	0,18	0,053

Как видно из табл. 1, опасная концентрация составляет порядка 600 мг/м<sup>3</sup>, что, как показывает термодинамический анализ, с большой долей вероятности будет сопутствовать

высокоскоростным методам обработки с использованием значительного количества СОЖ.

В этой связи, желательно, операционные режимы резания назначать из условия не

превышения температуры в зоне резания 350...400 °С.

Для этого, выражая из формулы (2) скорость резания и задаваясь определённой лимитирующей температурой в зоне резания, получим неравенство:

$$v \leq \sqrt[z_{\theta}]{\frac{\theta}{C_{\theta} t^{x_{\theta}} S^{y_{\theta}} v^{z_{\theta}} r^{n_{\theta}}}} \quad (4)$$

Наряду с концентрацией сероводорода вторым основным фактором является время его воздействия на работника.

Значения концентрации сероводорода и время его воздействия, вызывающие сопутствующие клинические симптомы, приведены в табл. 3.

### 3. Физиологические симптомы влияния концентрации паров сероводорода и времени его воздействия

#### 3. Physiological symptoms of the influence of hydrogen sulfide vapor concentration and the time of its exposure

Уровень	Классификация концентрации H <sub>2</sub> S (мг/м <sup>3</sup> )	Время воздействия				
		10 мин	30 мин	60 мин	240 мин	480 мин
1	не вызывает потерю трудоспособности	0,04	0,04	0,04	0,04	0,04
2	вызывает потерю трудоспособности	59,0	45,0	39,0	28,0	24,0
3	опасно для жизни	106	85,0	71,0	52,0	44,0
4	немедленный летальный исход	948	720	605	428	-

Кроме конкретного значения температуры в зоне резания на количество выделяемого на рабочем месте станочника сероводорода оказывает влияние объём стружки, рабочей части инструмента и заготовки, непосредственно контактирующей со струей СОЖ.

На основании приведённых рассуждений и данных, сформируем набор технологических ограничений, позволяющих оптимизировать операционные режимы и условия чернового и получистового обтачивания.

**Ограничение 1.** Это ограничение устанавливает связь между скоростью резания, определяемой принятой стойкостью инструмента, его геометрией, глубиной резания, подачей и механическими свойствами обрабатываемого материала с одной стороны, и скоростью резания, определяемой кинематикой станка с другой:

$$v = \frac{C_v \cdot K_v}{T^m \cdot t^{x_v} \cdot S^{y_v}} \quad (5)$$

где  $T$  – период стойкости инструмента;  $t$  и  $S$  – глубина резания и подача;  $C_v$ ,  $K_v$ ,  $m$ ,  $x_v$ ,  $y_v$  – коэффициенты, зависящие от конкретных условий операции соответственно [1].

Скорость резания, определяемая кинематикой станка:

$$v = \frac{\pi \cdot D \cdot n}{1000} \quad (6)$$

Тогда техническое ограничение, представленное в виде неравенства, будет иметь вид:

$$n \cdot S^{y_v} \leq \frac{318 \cdot C_v \cdot K_v}{T^m \cdot D \cdot t^{x_v}} \quad (7)$$

**Ограничения 2 и 3.** Характеризуют наибольшую и наименьшую скорость резания, возможную на станке выбранной модели:

$$n \geq n_{\text{ст. min}} \quad (8)$$

$$n \leq n_{\text{ст. max}} \quad (9)$$

**Ограничения 4 и 5.** Наименьшая и наибольшая допустимые подачи для конкретного станка:

$$S \geq S_{ст. \min}; \quad (10)$$

$$S \leq S_{ст. \max}. \quad (11)$$

$$n^{z_\theta} \cdot S^{y_\theta} \leq 10^{3z_\theta} \cdot \theta_{cp}/C_\theta \cdot \pi^{z_\theta} \cdot D^{z_\theta} \cdot t^{x_\theta} \cdot r^{n_\theta}, \quad (12)$$

где  $C_\theta$ ,  $x_\theta$ ,  $y_\theta$ ,  $n_\theta$  и  $z_\theta$  – коэффициенты в эмпирических зависимостях.

Для определения оптимальных режимов резания (в нашем случае  $n$  и  $S$ ) может быть применён метод линейного программирования. Суть метода заключается в определении неотрицательных значений переменных, удовлетворяющих системе ограничений в виде линейных неравенств, обеспечивающих наибольшее или наименьшее значение заданного критерия оптимальности или оценочной функции. Решению заданной задачи предшествует процедура приведения всех технических ограничений и оценочной функции к линейному виду.

На примере первого ограничения эта операция выглядит следующим образом:

$$\ln n + Y_v \cdot \ln S \leq \ln \left( \frac{318 \cdot C_v \cdot K_v}{T^m \cdot D \cdot t^{x_v}} \right). \quad (13)$$

Далее введём следующие обозначения:

$$\ln n = x_1; \ln(100S) = x_2; \ln \left( \frac{318 \cdot C_v \cdot K_v}{T^m \cdot D \cdot t^{x_v}} \right) = b_1$$

и подставив их в неравенство (13), получим:

$$x_1 + y_v \cdot x_2 \leq b_1. \quad (14)$$

Так как минимальная себестоимость технологической операции будет обеспечена при максимальном значении произведения  $n \times S$ , то для линейного вида модели оптимальную функцию  $f_0$  можно представить в виде

$$f_0 = (x_1 + x_2) \rightarrow \max. \quad (15)$$

Тогда математическая модель процесса резания на черновой и получистовой стадии будет выглядеть следующим образом:

**Ограничение 6.** Характеризует расчётное значение скорости резания, исключаящую вредную концентрацию сероводорода в рабочей зоне станка, использующего СОЖ. Преобразуя зависимость (3) в неравенство, аналогичное (7), получим:

$$\begin{cases} x_1 + y_v \cdot x_2 \leq b_1 \\ x_1 \geq b_2 \\ x_1 \leq b_3 \\ x_2 \geq b_4 \\ x_2 \leq b_5 \\ z_\theta x_1 + y_\theta x_2 \leq b_6 \end{cases} \quad (16)$$

Математическая модель процесса резания может быть изображена в графическом виде. В этом случае каждое техническое ограничение представляется граничной прямой, определяющей полуплоскость возможного существования решений системы неравенств. Граничные прямые, пересекаясь, образуют многоугольник, внутри которого любая точка удовлетворяет всем неравенствам (рис. 1). Этот многоугольник называют многоугольником решений.

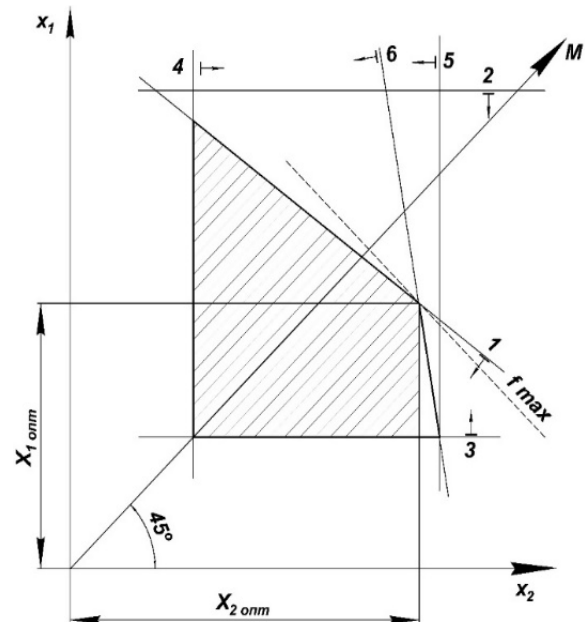


Рис. 1. Графическое изображение модели процесса резания

Fig. 1. Graphic representation of the cutting process model

Вычисление оптимальных значений  $X_{1\text{опт}}$  и  $X_{2\text{опт}}$  сводится к последовательному вычислению координат всех возможных точек перечисления граничных прямых и затем определению для них наибольшей суммы по выражению (15).

После определения координат  $X_{1\text{опт}}$  и  $X_{2\text{опт}}$  вычисляют оптимальные значения элементов режима резания по формулам:

$$n_{\text{опт}} = \exp(x_{1\text{опт}}); \quad (17)$$

$$S_{\text{опт}} = \exp(x_{2\text{опт}}) / 100. \quad (18)$$

Оптимизация режимов обтачивания для чистовой и отделочной стадий обработки, несмотря на выбранные в качестве примера только лезвийные методы, имеет многовариантные пути решения. Прежде всего, это касается наличия или отсутствия в технологическом маршруте термообработки и её технических условий.

Если термообработка запланирована после получистовой стадии и твёрдость не превышает 42...44 HRC, то чистовое и отделочное (тонкое) обтачивание можно осуществлять резцами из чёрной оксидной керамики типа ВОК. Если твёрдость поверхности более 55 HRC, то из лезвийных инструментов могут быть применены резцы из композитов на основе кубического нитрида бора.

Для оптимизации режимов операций финишной стадии технологического процесса в предложенную математическую модель следует добавить ещё два технических ограничения:

– по регламентированной шероховатости поверхности;

– по оптимальной степени наклёпа, определяемой в зависимости от конкретных условий эксплуатации детали [9 – 11].

Для рассматриваемого примера в качестве финишной операции выбран метод тонкого точения [12].

Зависимость шероховатости  $Ra$ , мкм, поверхности от режимов алмазного точения в общем виде имеет вид:

$$Ra = C_R \frac{Ra_{\text{пр}}^{KR} \cdot S^{Y_R} \cdot (90 + \gamma)^{n_R}}{V^{Z_R} \cdot \rho_{kp}^{m_R} \cdot r^{q_R}}, \quad (19)$$

где  $Ra_{\text{пр}}$  – шероховатость, полученная на предыдущей операции;  $S$  – подача;  $\gamma$  – передний угол резца;  $v$  – скорость резания;  $\rho_{kp}$  – радиус округления главной режущей кромки;  $r$  – радиус при вершине резца;  $C_R, K_R, Y_R, n_R, Z_R, m_R, q_R$  – коэффициенты, зависящие от конкретных условий обработки.

Преобразуя зависимость (19) в неравенство, получим:

$$\frac{n^{Z_R}}{S^{Y_R}} \leq \frac{C_R \cdot Ra_{\text{пр}}^{K_R} \cdot (90 + \gamma)^{n_R} \cdot 1000^{Z_R}}{Ra \cdot (\pi \cdot D)^{Z_R} \cdot \rho_{kp}^{m_R} \cdot r^{q_R}}. \quad (20)$$

В математическую модель алмазного точения приведенное неравенство включается после логарифмирования аналогично первому ограничению.

Как уже было сказано, включение в математическую модель технического ограничения по уровню наклёпа поверхностного слоя способствует повышению эксплуатационных свойств деталей машин. При эксплуатации в условиях трения скольжения или знакопеременных нагрузок в подавляющем большинстве случаев стремятся получать поверхностный слой со значительными коэффициентами степени наклёпа  $K_H$ , который определяется как отношение поверхностной к исходной микротвёрдости материала:

$$K_H = H_{\text{пов.}} / H_{\text{исх.}} \quad (21)$$

Общий вид зависимости  $K_H$  от режимов тонкого точения [8] представлен в формуле (22):

$$K_H = C_H \cdot t^{x_H} \cdot S^{y_H} \cdot V^{z_H} \cdot r^{q_H}, \quad (22)$$

где  $t$  – глубина резания;  $S$  – подача;  $v$  – скорость резания;  $r$  – радиус при вершине резца;  $C_H, x_H, y_H, z_H, q_H$  – коэффициенты, учитывающие условия обработки.

Значения коэффициентов и констант в формуле (22) для расчёта параметра  $K_H$  приведены в табл. 4.

4. Значения коэффициентов в формуле (22) при обработке резцом из композитов 01 и 10

4. The values of the coefficients in the formula (22) when chiselling with a cutter made of composites 01 and 10

Обрабатываемый материал	$C_H$	$x_H$	$y_H$	$z_H$	$q_H$
Сталь 45, 40...44 HRC	1,25	0,027	0,180	-0,041	0,028
Сталь 65Г, 60...64 HRC	1,75	0,029	0,016	-0,040	0,031

После стандартного преобразования получим неравенство, представляющее собой техническое ограничение по наклёпу поверхностного слоя:

$$\frac{n^{z_H}}{S^{y_H}} \leq \frac{C_H \cdot t^{x_H} \cdot r^{q_H} \cdot 1000^{z_H}}{K_H \cdot (\pi \cdot D)^{z_H}} \quad (23)$$

В случае отсутствия в маршруте обработки конкретной детали термообработки коэффициент  $C_H$  следует умножить на 1,08, т. к. в результате действия механизма

наследственности на финишной операции обрабатываемый материал уже будет иметь поверхностную твёрдость, отличную от твёрдости исходной [13].

Работоспособность предложенных математических моделей была протестирована на конкретных примерах оптимизации режимов резания при обработке валов трибосистемы подшипник скольжения.

Результаты тестирования приведены в табл. 5.

5. Результаты тестирования математической модели процесса резания

5. Results of testing the mathematical model of the cutting process

Чистовое точение								Тонкое точение							
Оптимальные режимы								Оптимальные режимы							
Без технического ограничения по микроклимату				С техническим ограничением по микроклимату				Без технического ограничения по наклёпу				С техническим ограничением по наклёпу			
Сталь 45 закалённая		Сталь 65Г закалённая		Сталь 45 закалённая		Сталь 65Г закалённая		Сталь 45 закалённая		Сталь 65Г закалённая		Сталь 45 закалённая		Сталь 65Г закалённая	
S	v	S	v	S	v	S	v	S	v	S	v	S	v	S	v
мм/об	м/мин	мм/об	м/мин	мм/об	м/мин	мм/об	м/мин	мм/об	м/мин	мм/об	м/мин	мм/об	м/мин	мм/об	м/мин
0,18	142	0,15	131	0,14	121	0,13	108	0,11	221	0,09	184	0,10	152	0,09	142

Как видно из приведённых результатов, существенной корректировке в сторону уменьшения подвергалась скорость как чистового, так и тонкого точения. Очевидно, что подобного результата следовало ожидать, т. к. технические ограничения по микроклимату рабочих зон и наклёпу поверхностного слоя по своей физической сущности скорость резания делают главным фактором, определяющим обоснованность многокритериальной оптимизации.

**Заключение**

Предложенный в данной работе подход позволил более широко представить проблему оптимизации режимов механической обработки, затрагивающей сегодня только сферу операционных технологий. Используя в качестве целевой функции (критерия оптимизации) лишь производительность труда, в условиях современного производства представляется

явно недостаточным. Таким подходом мы исключаем технолога, как главной фигуры обрабатывающего производства, от обязанностей и забот как по оздоровлению климата в механических цехах, так и от задач обеспечения надёжности и долговечности выпускаемой продукции. Как показывает практика использования многокритериальных моделей оптимизации, снижение основного времени на чистовых и финишных операциях технологического процесса вполне компенсируется снижением затрат на поддержание приемлемого микроклимата и, в тоже время, обеспечивает достижение заданного ресурса выпускаемой продукции.

**СПИСОК ИСТОЧНИКОВ**

1. **Качество** машин: справочник: в 2 т. Т. 1. / А.Г. Суслов, Э.Д. Браун, Н.А. Виткевич [и др.]; под общ. ред. А.Г. Суслова. М.: Машиностроение, 1995. 256 с. ISBN 5-217-02707-X.



2. Старков В.К. Обработка резанием. Управление стабильностью и качеством в автоматизированном производстве: монография / В.К. Старков. М.: Машиностроение, 1989. 296 с. ISBN 5-217-00833-1.

3. Суслов А.Г. Дальский А.М. Научные основы технологии машиностроения. М.: Машиностроение. 2002. 684 с. ISBN 5-217-03108-5.

4. Бонди Б. Основы линейного программирования / Б. Бонди: пер. с англ. М.: Радио и связь, 1989. 176 с. ISBN 5-256-00186-8.

5. Лунгу К. Н. Линейное программирование. Руководство к решению задач. М.: Физматлит, 2005. 128 с. ISBN 5-9221-0631-7.

6. Боршова Л.В. Оптимизация процесса механической обработки деталей сложного профиля: монография / Л.В. Борисова, В.Ф. Пегашник, М.В. Миронова. Нижний Тагил: НТИ УрФУ, 2019. 150 с. ISBN 978-5-9544-0099-1.

7. Тотай А.В., Зяблова Е.С., Кареев Р.Р., Лексина Я.И. Оптимизация микроклимата рабочих зон металлорежущих станков // Научный аспект. Самара, 2020. Т.6. С. 817–827

8. Muller-Hummel, Lahres M. Temperature measurement on diamond-coated tools during machining // Ind. Diam. Rev. 1995. 55, №2.

9. Тотай А.В. Технологическое обеспечение физико-химических свойств поверхностного слоя деталей машин / Научно-технические технологии в машиностроении. 2012. №9. С. 8–11.

10. Инженерия поверхности деталей / Колл. авт.; под ред. А.Г. Суслова. М.: Машиностроение. 2008. 320 с. ISBN 978-5-217-03427-7.

11. Алехин В.П., Алехин О.В. Физические закономерности деформации поверхностных слоёв материалов монография / В.П. Алехин, О.В. Алехин; М-во здравоохранения и науки Российской Федерации, Московский гос. индустриальный ун-т. М.: Изд-во МГИУ, 2011. 455 с. ISBN 978-5-2760-1914-7.

12. Технологическое обеспечение и повышение эксплуатационных свойств деталей и их соединений / А.Г. Сулов, В.П. Федоров, О.А. Горленко [и др.]; под общ. ред. А.Г. Суслова. М.: Машиностроение. 2006. 447 с. ISBN 5-217-03308-8.

13. Totay A.V. Integral criterion of the state of physical parameters of the surface layer of machine parts / A.V. Totay, M.N. Nagorkin // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering 2021. Vol. 1061. 012040. doi: 10.188/1757 899X/1061/1/01204.

## REFERENCES

1. Machine Quality: reference book. In 2 Vol., Vol. 1 / A.G. Suslov, E.D. Brown, N.A. Vitkevich et al. Moscow: Mashinostroenie, 1995, 256 p. ISBN 5-217-02707-X.

2. Starkov V.K. Cutting processing. Stability and quality management in automated production: monograph / V.K. Starkov. Moscow: Mashinostroenie, 1989. 296 p. ISBN 5-217-00833-1.

3. Suslov A.G. Dalsky A.M. Scientific foundations of engineering technology. Moscow: Mashinostroenie, 2002, 684 p. ISBN 5-217-03108-5.

4. Bondi B. The main programs of linear software/ B. Bondi: trans. from Engl. Moscow: Radio and Communications, 1989., 176 p. ISBN 5-256-00186-8.

5. Lungu K. N. Linear programming. A guide to solving problems. Moscow: Fizmatlit, 2005, 128 p. ISBN 5-9221-0631-7.

6. Borshova L.V. Optimization of mechanical processing process of parts with complex profile: monograph / L.V. Borisova, V.F. Pegashnik, M.V. Mironova. Nizhny Tagil: NTI UrFU, 2019. 150 p. ISBN 978-5-9544-0099-1.

7. Totai A.V., Zyablova E.S., Kareev R.R., Leksina Ya.I. Optimization of microclimate of working zones of metal-cutting machines // Scientific aspect. Samara, 2020, vol.6, pp. 817–827.

8. Muller-Hummel, Lahres M. Temperature measurement on diamond-coated tools during machining // Ind. Diam. Rev. 1995. 55, № 2.

9. Totai A.V. Engineering support of physico-chemical properties of the surface layer of machine parts / Science-intensive technologies in mechanical engineering, 2012, No. 9. pp. 8–11.

10. Part surface engineering / Composite authors; edited by A.G. Suslov. Moscow: Mashinostroenie, 2008, 320 p. ISBN 978-5-217-03427-11

11. Alekhin V.P., Alekhin O.V. Physical patterns of deformation of surface layers of materials monograph / V.P. Alekhin, O.V. Alekhin; Ministry of Health and Science of the Russian Federation, Moscow State. industrial university M.: Publishing house MGIU, 2011. 455 p. ISBN 978-5-2760-1914-7.

12. Engineering support and improvement of operational properties of parts and their joints/ A.G. Suslov, V.P. Fedorov, O.A. Gorlenko [et al.]; under the general editorship of A.G. Suslov. Moscow: Mashinostroenie, 2006, 447 p. ISBN 5-217-03308-8.

13. Totay A.V. Integral criterion of the state of physical parameters of the surface layer of machine parts / A.V. Totay, M.N. Nagorkin // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering 2021. Vol. 1061. 012040. doi: 10.188/1757 899X/1061/1/0120

**Вклад авторов:** все авторы сделали эквивалентный вклад в подготовку публикации. Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

**Contribution of the authors:** the authors contributed equally to this article. The authors declare no conflicts of interests.

Статья поступила в редакцию 07.07.2023; одобрена после рецензирования 17.07.2023; принята к публикации 24.07.2023.

The article was submitted 07.07.2023; approved after reviewing 17.07.2023; assepted for publication 24.07.2023.