

тод определения долготы использовался на практике более ста лет вместе с хронометром, изобретенным Т. Харрисоном.

Почти двадцать лет спустя Эйлер разработал другой метод, отличный от предыдущего, и даже более совершенный для определения движения Луны, описанный в его «Теории движения Луны, интерпретируемой новым методом». Полное значение этого нового метода стало понятным только через сто лет благодаря работам американского астронома Д.У. Хилл, который непосредственно развил идеи Эйлера и связанные с ними исследования Э.В. Брауна, что привело к разработке современных и чрезвычайно точных лунных таблиц. Эти и другие астрономические работы Эйлера содержат важные результаты общей механики [7,8].

Работы Эйлера по механике сегодня не утратили своей ценности как первоисточник для многочисленных дополнительных исследований. Велики его заслуги в развитии науки в России. «Вместе с Петром I и Ломоносовым, - писал академик С. И. Вавилов, - Эйлер стал добрым гением нашей Академии, определившим ее славу, ее крепость, ее продуктивность».

#### Список литературы

1. Самин Д. К. Сто великих ученых, книги. - М., 2004 - С. 590.
2. Соломатин В. А. История науки. Учебник. - М.: PER SE, 2003 - С.352.
3. Любомиров Д. Е., Сапенко О. В., Петров С. О. История и философия науки: Учебное пособие

для организации самостоятельной работы аспирантов и соискателей. -М.: 2008 - С. 76.

4. А. Н. Крылов, Леонард Эйлер, Собрание сочинений академика А. Н. Крылова. Том.1 Часть 2 Научно-популярные статьи. Биографические характеристики, Издательство Академии наук СССР, -М.: -Л.: 1951 - С. 324.

5. Козлов В. В., Эйлер и математические методы механики - М.: Наука 2007 - С. 26.

6. Дрофман Я. Г. Всемирная история физики, с древнейших времен до конца XVIII века. -М.: Наука, 2007 - С.317.

7. Голин Г. М., Филонович С. Р. Классика физической науки -М.: Наука, Высшая школа, 1989 - С.576.

8. Ismailov G.M. A Study of Flexible Cable Strength with Regard to Tribological Interaction of Its Elements/ Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part J: Journal of Engineering Tribology. 2019. 233. № 4. pp. 638-648.

9. G M Ismailov, A E Tyurin, R.V. Ikonnikova, Y.S. Sarkisov, M.S. Pavlov, V.E. Mineev The force interaction of flexible cable elements under operation condition /IOP Conf. Series: Earth and Environmental Science 87 (2017) 082023 doi:10.1088/1755-1315/87/8/082023.

10. Ismailov G., Slobodenyuk A., Nevinityna V., Osipkina Y., Matevosyan T. Scientific works of Leonardo Euler on mechanics International independent scientific journal. - 2021. - №29. - p. 49-52.

## ОПТИМИЗАЦИЯ КОНСТРУКТОРСКО-ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ ПРОЦЕССА СВЕРЛЕНИЯ ОТВЕРСТИЙ НА ОСНОВЕ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ ФУНКЦИОНАЛЬНОЙ СЕМАНТИЧЕСКОЙ СЕТИ

*Миронова М.Н.*

*Белорусско-Российский университет, Могилев, Республика Беларусь*

## OPTIMIZATION OF DESIGN AND TECHNOLOGICAL PARAMETERS OF THE HOLE DRILLING PROCESS BASED ON USING A FUNCTIONAL SEMANTIC NETWORK

*Mironova M.*

*Belarusian-Russian University, Mogilev, Republic of Belarus*

#### Аннотация

Рассмотрены вопросы обеспечения точности расположения осей обрабатываемых отверстий. Использован подход, базирующийся на технологиях функциональных семантических сетей. Рассмотрена возможность многофакторной оптимизации параметров механической обработки с целью обеспечения точности на основе комплексного подхода. Проведен анализ влияния конструктивно-технологических факторов на точность расположения осей обрабатываемых отверстий.

#### Abstract

The questions of assurance of accuracy of location of axes of the processed openings are considered in this article. It is used the approach which is based technologies of functional semantic networks. The possibility of multifactor optimization of machining parameters in order to ensure accuracy based on an integrated approach is considered. The analysis of influence of design-engineering factors on the accuracy of location of axes of the processed openings is carried out.

**Ключевые слова:** оптимизация, сверление, функциональная семантическая сеть.

**Keywords:** optimization, drilling, functional semantic network.

Оптимизация конструкторско-технологических параметров процесса сверления с целью обеспечения точности расположения оси отверстия представляет собой актуальную задачу технологии машиностроения, решение которой позволяет гарантировать точность работы механизмов и машин, а также их надежность. Повышение точности расположения оси отверстия упрощает пригоночные работы при сборке, позволяет осуществить принцип взаимозаменяемости деталей и узлов, вести точную сборку, что не только сокращает ее трудоемкость, но также облегчает и удешевляет проведение ремонта машин в условиях их эксплуатации.

В то же время для обеспечения конкурентоспособности новых изделий при подготовке производства и их изготовлении требуется отслеживать соотношение двух групп критериев:

1) качество получаемого изделия, где важным параметром считается суммарная погрешность обработки  $\Delta_{\Sigma}$ ;

2) цены изделия, где значимым параметром является себестоимость изделия  $C$ .

Таким образом, оптимизацию технологических процессов можно рассматривать как многокритериальную задачу оптимизации конструкторско-технологических параметров. То есть при проектировании техпроцесса обработки отверстий эффективность каждого варианта необходимо оценивать не по одному, а сразу по двум показателям  $\Delta_{\Sigma}$  и  $C$ .

Тогда задача управления на основе использования функциональной семантической сети сводится к задаче [1]:

$$\begin{cases} \Delta_{\Sigma}(\pi_1, \dots, \pi_i, \dots, \pi_n) \rightarrow \min; \\ C \rightarrow \min; \\ \pi_i \in \{R_i\}, \end{cases} \quad (1)$$

где  $\Delta_{\Sigma}(\pi_1, \dots, \pi_i, \dots, \pi_n)$  – суммарная погрешность обработки, учитывающая  $n$  параметров технологического процесса и оснащения, мм;

$C$  – себестоимость выполнения технологического перехода, р;

$\pi_i$  –  $i$ -й параметр технологического процесса и оснащения;

$\{R_i\}$  – область ограничений  $i$ -го параметра.

Однако в общем случае не существует решения задачи оптимального проектирования технологического процесса, которое обращало бы в минимум два критерия одновременно.

Ввиду того, что оценка вариантов сразу по нескольким критериям затруднительна, можно объединить два критерия в один обобщенный в виде взвешенной суммы отдельных критериев [2]:

$$K = a_1 \Delta_{\Sigma} + a_2 C, \quad (2)$$

где  $a_i$  – весовые коэффициенты важности критериев,  $0 \leq a_i \leq 1$ .

При этом

$$\sum_{i=1}^k a_i = 1. \quad (3)$$

Следовательно, использование комплексного критерия позволяет задачу нахождения оптимальных конструкторско-технологических параметров (режимов резания и др.) с двумя критериями свести к задаче с одним критерием.

$$K = \sum_{i=1}^k a_i K_i \rightarrow \min. \quad (4)$$

При этом назначение оптимальных конструкторско-технологических параметров, используя комплексную целевую функцию, позволит вести обработку с наибольшей экономичностью и наименьшей суммарной погрешностью обработки.

В настоящее время проблема обеспечения точности расположения оси отверстия решается тремя способами: за счет улучшения качества технологической системы; на основе устранения факторов, порождающих погрешности обработки; путем управления процессом обработки. Альтернативу таким подходам может составить подход, базирующийся на методах искусственного интеллекта [3]. При этом средством проектирования технологического процесса и оснастки являются компьютерные программы, использующие технологии функциональных семантических сетей [4], представляющих собой логическую схему, описывающую функциональные взаимосвязи между аргументами совокупности математических зависимостей. Возможность преобразования функциональных семантических сетей в последовательность вычисляемых функций позволяет автоматизировать процедуру поиска оптимальных параметров технологического процесса и оснащения, которые обеспечивают снижение погрешности расположения оси отверстия при сверлении и уменьшение себестоимости обработки.

Для эффективного управления точностью расположения оси отверстия требуются знания о взаимосвязях между параметрами технологического процесса и оснащения, а также степени их влияния на суммарную погрешность обработки. Известно, что смещение оси отверстия от номинального положения возникает в условиях сложного взаимодействия комплекса конструктивно-технологических факторов и зависит, в первую очередь, от характеристик приспособления, станка, инструмента и режимов резания.

Так, на рисунке 1 представлена схема, иллюстрирующая образование погрешности расположения оси отверстия, которая определяется геометрическим смещением оси инструмента, упругими перемещениями в технологической системе, геометрической точностью технологического обо-

рудования (конструктивных элементов приспособления, установки заготовки, взаимным расположением узлов между собой), а также температурными деформациями технологической системы. Из рисунка 1 видно, что факторы, влияющие на величину пространственного смещения оси отверстия, можно классифицировать на две основные группы

по причинам их возникновения – конструктивно-технологические параметры, определяемые при проектировании и изготовлении технологического оборудования, а также собственно технологические факторы, действие которых проявляется в процессе производства изделий.

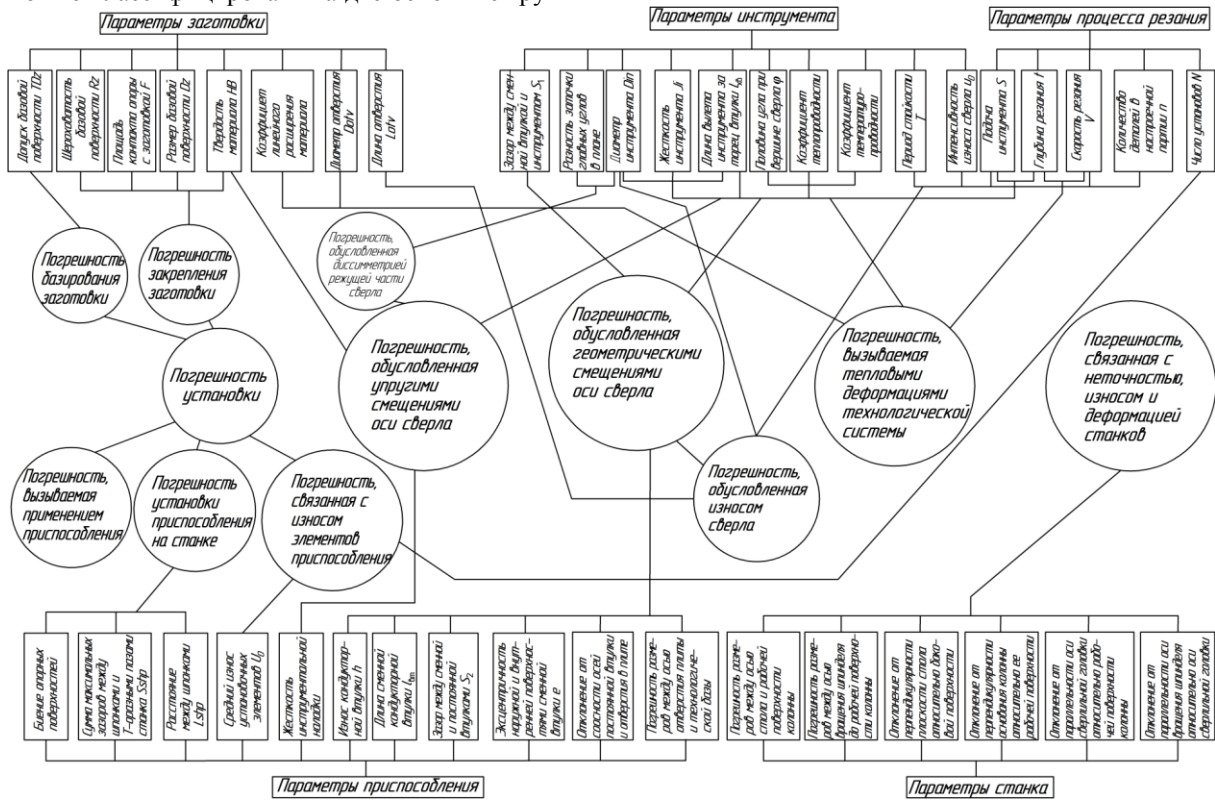


Рисунок 1. Схема, иллюстрирующая влияние параметров технологического процесса и оснащения на составляющие суммарной погрешности обработки

Для того, чтобы использовать функциональную семантическую сеть для решения технологических задач – таких, как обеспечение точности обработки отверстий, необходимо построить базу знаний на основе анализа отдельных составляющих погрешности обработки.

В общем случае суммарную погрешность расположения оси отверстия можно описать зависимостью

$$\Delta_{\Sigma} = k \sqrt{\epsilon_6^2 + \epsilon_3^2 + \epsilon_{пр}^2 + \Delta_y^2} + \Delta_{Г} + \Delta_{Т} + \Delta_c \quad (5)$$

где  $k$  – коэффициент, учитывающий отклонение закона распределения случайных погрешностей от нормального;

$\epsilon_6$  – погрешность базирования заготовки, мм;

$\epsilon_3$  – погрешность закрепления заготовки, мм;

$\epsilon_{пр}$  – погрешность, обусловленная использованием приспособления, мм;

$\Delta_y$  – погрешность обработки, обусловленная упругим смещением оси сверла, мм;

$\Delta_{Г}$  – погрешность обработки, обусловленная геометрическим смещением оси сверла, мм;

$\Delta_{Т}$  – погрешность, вызываемая тепловыми деформациями технологической системы, мм;

$\Delta_c$  – погрешность, связанная с неточностью, износом и деформацией станков, мм.

Математическая модель образования суммарной погрешности расположения оси отверстия, основанная на функциональных семантических сетях, использует зависимость (5), эквивалентную выражению

$$\Delta_{\Sigma} = f(\Delta_1, \dots, \Delta_i, \dots, \Delta_m), \quad (6)$$

где  $\Delta_i$  –  $i$ -я составляющая суммарной погрешности расположения оси отверстия.

В общем случае составляющие суммарной погрешности расположения оси отверстия при сверлении могут быть, в свою очередь, представлены в виде

$$\Delta_i = g(\pi_1, \dots, \pi_j, \dots, \pi_k), \quad (7)$$

где  $\pi_j$  –  $j$ -й параметр технологического процесса или технологического оснащения.

Для обеспечения точности расположения оси

отверстия на основе использования функциональных семантических сетей необходимо зависимости, определяющие составляющие погрешности, преобразовать в отношения сети, что будет эквивалентно условию

$$h_i(\pi_1, \dots, \pi_j, \dots, \pi_k) = \Delta_i - g(\pi_1, \dots, \pi_j, \dots, \pi_k) = 0, (8)$$

$$\Delta_{\Sigma} - f(g_1(\pi_1, \dots, \pi_{k_1}), \dots, g_i(\pi_1, \dots, \pi_{k_i}), \dots, g_m(\pi_1, \dots, \pi_{k_m})) = 0. (9)$$

Формула (9) эквивалентна главному отношению функциональной семантической сети, которое при нахождении решения должно быть равно нулю.

На основе систематизации результатов исследований, приведенных в технической литературе [5-12], были установлены отношения, определяющие составляющие погрешности, учитываемые зависимостью (5).

Помимо этого в математической модели суммарной погрешности расположения оси отверстия предложено учитывать, что упругое смещение оси сверла возникает в результате неравномерной загрузки его кромок при снятии ими неравномерного напуска, определяемого диссимметрией режущей части сверла. В ходе проведенных теоретических исследований была выведена зависимость, определяющая погрешность, обусловленную диссимметрией режущей части сверла:

$$\Delta_{in} - D \left( 2 \frac{\tau \operatorname{tg} \varphi_1 - \tau \operatorname{tg} \varphi_2 \operatorname{tg} \varphi_1}{\operatorname{tg} \varphi_1 + \operatorname{tg} \varphi_2} - 1 \right) = 0, (10)$$

где  $D$  – диаметр сверла, мм;

$\tau$  – длина перемычки сверла, мм;

$\varphi_1, \varphi_2$  – главные углы в плане, град.

В качестве второго критерия оптимизации конструкторско-технологических параметров предложено использовать стоимость основного времени технологического перехода. Тогда отношение семантической сети будет иметь вид:

$$C - t_o \left( C_{ин} + C_{\text{Э}} + \left( \frac{C_o + C_A}{60} \left( 1 + \frac{t_{cu}}{T} \right) \right) \right) = 0 (11)$$

где  $T$  – период стойкости инструмента, мин;

$t_{cu}$  – время смены инструмента или грани режущей пластины, мин;

$C_o$  – заработная плата основных производственных рабочих;

$C_A$  – затраты по амортизационным отчислениям на оборудование;

$C_{ин}$  – затраты на инструмент;

$C_{\text{Э}}$  – затраты на технологическую энергию.

На основе результатов анализа зависимостей построена функциональная семантическая сеть для оптимизации конструкторско-технологических параметров процесса сверления отверстий (рисунок

где  $h_i(\pi_1, \dots, \pi_j, \dots, \pi_k)$  –  $i$ -е отношение функциональной семантической сети.

Тогда суммарную погрешность расположения оси отверстия при сверлении можно представить как

2), включающая 29 отношений и учитывающая до 88 параметров.

Изменение параметров сети позволяет управлять величиной суммарной погрешности расположения оси отверстия при сверлении, а также себестоимости обработки. Однако практически изменять можно только ряд параметров. Так, например, сила резания зависит от твердости заготовки, глубины резания, подачи, материала сверла, его геометрии. Очевидно, что для управления силой резания из этих параметров могут быть изменены только подача и глубина резания. Похожий анализ проводился и для других составляющих общей погрешности при выборе управляемых факторов.

Оценка влияния параметров технологического процесса и технологического оснащения на суммарную погрешность обработки позволила выделить два их типа – неуправляемые и управляемые, величины которых могут корректироваться при поиске решения в пределах заданных ограничений.

Неуправляемые параметры включают входные данные и параметры технологического процесса, значения которых фиксированы (например, допуск на выполняемый размер).

Управляемые параметры представляют собой параметры технологического процесса, которые могут изменяться с учетом конкретных производственных условий (подача, скорость резания и т. д.), в связи с чем их величины можно корректировать в пределах заданных ограничений. Выбор управляемых параметров базировался на анализе общих технологических подходов к обеспечению точности механической обработки, выбору ее режимов, анализу конструктивных параметров технологического оснащения и т. д. При таком выборе также учитывалась возможность экономической целесообразности управления параметрами технологического процесса и оснащения.

В качестве управляемых параметров используются количество деталей в настроечной партии, обрабатываемых в период между подналадками станка  $n$ ; подача инструмента  $S$ ; скорость резания  $V$ ; площадь контакта опоры с заготовкой  $F$ ; длина образующей, по которой происходит контакт заготовки с приспособлением  $l$ ; износ установочных элементов приспособления  $U$ ; число установов  $N$  заготовок в приспособление; время работы станка  $t_c$  и др.

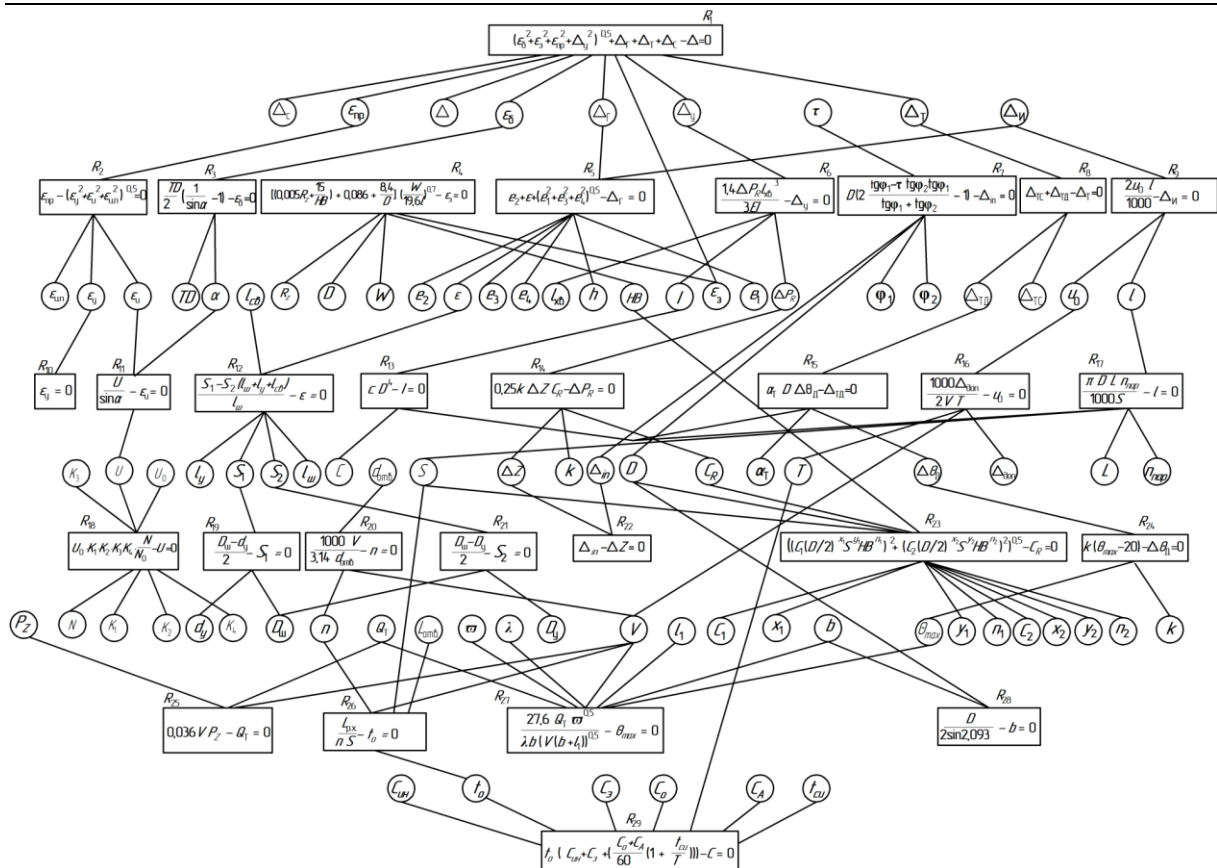


Рисунок 2. Функциональная семантическая сеть для оптимизации конструкторско-технологических параметров процесса сверления отверстий

На основе анализа отношений функциональной семантической сети установлено, что в качестве управляемых параметров эффективно могут быть использованы до 20 факторов, что позволяет обеспечить более высокое качество решения за счет увеличения их количества по сравнению с принятыми методиками.

Таким образом, управление процессом сверления на функциональной семантической сети заключается в том, чтобы, используя зависимости, определить значения параметров процесса обработки и применяемого технологического оснащения, при которых обеспечивался бы максимальный запас точности с наибольшей экономичностью.

Для реализации подхода, базирующегося на технологиях функциональных семантических сетей, была создана интеллектуальная система, отличающаяся возможностью самостоятельного формирования вычислительных процедур в процессе решения задач, позволяющая вести обработку с наибольшей экономичностью и наименьшей суммарной погрешностью обработки отверстий на основе выбора оптимальных параметров технологического процесса и оснащения с использованием функциональных семантических сетей.

Использование такой системы позволяет проанализировать последствия изменений параметров технологического процесса и оснащения, исключить недопустимые варианты и выделить наиболее удачные решения, вследствие чего дает возмож-

ность повысить их научную и инженерную обоснованность, а также качество управления технологическим процессом.

**Список литературы**

1. Миронова, М. Н. Обобщенный критерий оптимизации режимов сверления отверстий / М. Н. Миронова, А. И. Ефременко // *Материалы, оборудование и ресурсосберегающие технологии: материалы Междунар. науч.-техн. конф., Могилев, 23–24 апр. 2020 г.* / Белорус.-Рос. ун-т ; редкол.: М. Е. Лустенков [и др.]. – Могилев, 2020. – С. 53-54.
2. Вентцель, Е. С. *Исследование операций* / Е. С. Вентцель. – Москва: Наука, 1980. – 122 с.
3. *Искусственный интеллект: справочник в 3 кн.* / Э. В. Попов [и др.]; под ред. Э. В. Попова – М.: Радио и связь, 1990. – Кн. 1: Системы общения и экспертные системы. – 1990. – 464 с.
4. Пашкевич, В. М. *Функциональные семантические сети для обеспечения точности механической обработки* / В. М. Пашкевич, М. Н. Миронова. – Могилев: Белорус.-Рос. ун-т, 2015. – 200 с.
5. Маталин, А. А. *Точность механической обработки и проектирование технологических процессов* / А. А. Маталин. – Л.: Машиностроение, 1970. – 320 с.
6. Косилова, А. Г. *Точность обработки, заготовки и припуски в машиностроении: справочник технолога* / А. Г. Косилова, Р. К. Мешеряков, М. А. Калинин. – М.: Машиностроение, 1976. – 288 с.

7. Данилевский, В. В. Справочник молодого машиностроителя: справочник для молодых рабочих машиностроительных заводов и учащихся проф.-техн. училищ / В. В. Данилевский. – 3-е изд., доп. и перераб. – М.: Высш. шк., 1973. – Т. 1. – 648с.
8. Резников, А. Н. Теплофизика резания / А. Н. Резников – М.: Машиностроение, 1981. – 279 с.
9. Аршинов, А. А. Резание металлов и режущий инструмент / А. А. Аршинов, Г. А. Алексеев. – М.: Машиностроение, 1967. – 500 с.
10. Дерябин, И. П. Методология параметрического проектирования многопереходной обработки круглых отверстий концевыми мерными инструментами: автореф. дис. ... д-ра техн. наук: 05.02.08 / И. П. Дерябин; Челяб. гос. техн. ун-т. – Челябинск, 2009. – 36 с.
11. Косилова, А. Г. Точность обработки деталей на автоматических линиях / А. Г. Косилова. – М.: Машиностроение, 1976. – 224 с.
12. Жолобов, А. А. Прогнозирование и обеспечение качества технологических систем на этапах их проектирования и изготовления / А. А. Жолобов. – Могилев: Белорус.-Рос. ун-т, 2005. – 304 с.