

## ТЕХНИЧЕСКИЕ НАУКИ



УДК 621.91.01+531.44+621.923

### Влияние технологической наследственности на обработку отверстий с использованием инструментов, заточенных различными методами

**В.И. Бутенко, Р.Г. Кадач**

Донской государственный технический университет, г. Ростов-на-Дону, Российская Федерация

#### Аннотация

В статье исследуется степень влияния технологической наследственности в процессе обработки отверстий в зависимости от способа заточки инструментов, участвующих в процессе резания. Показано, что способ заточки металлорежущих инструментов, участвующих в процессе обработки отверстия, влияет на итоговые и промежуточные показатели качества. Составлены математические модели, предназначенные для прогнозирования промежуточных и итоговых значений показателей качества в цикле обработки отверстия, учитывающие использование инструмента, подвергнутого различным способам заточки и коэффициентов технологического наследования.

**Ключевые слова:** способ заточки, сверло, зенкер, развёртка, стойкость, йод, диодид хрома, технологическая наследственность, шероховатость поверхности

**Для цитирования.** Бутенко В.И., Кадач Р.Г. Влияние технологической наследственности на обработку отверстий с использованием инструментов, заточенных различными методами. *Молодой исследователь Дона*. 2025;10(4):59–65.

### Influence of the Technological Heredity on Hole Machining Using Tools Sharpened by Different Techniques

**Viktor I. Butenko, Roman G. Kadach**

Don State Technical University, Rostov-on-Don, Russian Federation

#### Abstract

The article studies the influence of technological heredity on the process of hole machining depending on the method of cutting tool sharpening. The influence of the method of sharpening the metal-cutting tools intended for hole machining on the ultimate and intermediate quality indicators was confirmed. Mathematical models were developed to predict the intermediate and ultimate values of quality indicators within the hole machining cycle, taking into account the different tool sharpening methods and technological heredity coefficients.

**Keywords:** sharpening method, drill, countersink, reamer, durability, iodine, chromium diiodide, technological heredity, surface roughness

**For Citation.** Butenko VI, Kadach RG. Influence of the Technological Heredity on Hole Machining Using Tools Sharpened by Different Techniques. *Young Researcher of Don*. 2025;10(4):59–65.

**Введение.** Выполненные в технологии машиностроения исследования, направленные на улучшение качества поверхности с целью повышения эксплуатационных характеристик деталей, фокусировались, как правило, на методах и условиях последней операции в технологическом процессе обработки деталей. При этом не учитывалось влияние предыдущих этапов производственного цикла на такие важные параметры, как износостойкость, контактная жёсткость, усталостная прочность и другие эксплуатационные свойства готовых изделий [1].

Результаты исследований, проведенных П.И. Ящерицыным, М.Л. Хейфецом, Г.К. Маркаряном, Э.В. Рыжовым, В.М. Смелянским, В.Ю. Блюменштейном, А.М. Дальским, А.Г. Сусловым, А.И. Аверченко, М.Н. Нагоркиным и другими учёными [1–11], подтверждают неэффективность традиционного подхода к проектированию технологических процессов механической обработки деталей. Установлено, что существует технологическая наследственность в формировании показателей качества рабочих поверхностей деталей машин. Важно отметить, что наследственность проявляется не только на чистовых операциях, но и может влиять на изменение свойств или потерю точности формы готовой детали в процессе эксплуатации.

Целью настоящего исследования является изучение степени влияния различных способов заточки инструментов на итоговые и промежуточные показатели эффективности много переходной обработки отверстий.

Научная новизна исследований заключается в том, что технологическая наследственность такого показателя качества обработанной поверхности заготовки, как шероховатость  $Ra$ , сравнивается в зависимости от способа заточки инструментов, формирующих её в процессе много переходной обработки отверстия. Исследовано влияние способов заточки на способность инструментов сохранять свою стойкость вследствие проявления технологической наследственности.

**Основная часть.** Было установлено [12], что при обработке железоуглеродистых сталей, наиболее эффективным способом заточки инструмента является заточка импрегнированным абразивным кругом с подачей в зону обработки диоксида хрома и сульфата железа. В связи с этим возникает задача установить математические модели наследования, при включении данной обработки на один из этапов цикла обработки отверстия.

Технологический процесс изготовления и эксплуатации деталей может быть представлен в виде графа, включающего при изготовлении заготовительные, черновые, чистовые и отделочные операции, а также стадии эксплуатации детали [7, 13]. При этом граф является ориентированным, а параметры качества взаимосвязаны между собой (рис. 1).

Начальная вершина графа, при описании технологического процесса и эксплуатации представляет собой заготовку (З). Конечная вершина — готовая деталь (Д) в процессе эксплуатации. Ориентированные рёбра графа показывают передачу свойств детали при обработке и в эксплуатации.

Передача рёбра описывается коэффициентом наследования  $K$ , показывающим количественное изменение свойств и равным отношению предыдущих  $S_j$  и последующих  $S_{j+1}$  значений свойства [2, 7, 14]:

$$K = \frac{S_j}{S_{j+1}}. \quad (1)$$

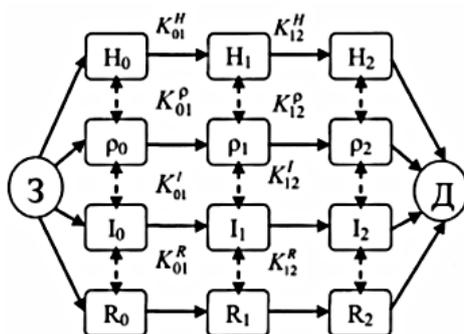


Рис. 1. Развёрнутый граф технологического наследования, учитывающий комплекс эксплуатационных параметров качества [7]

Для исследования технологической наследственности, были использованы результаты исследований, представленные в работе Дальского А.М. [15] в несколько упрощённом варианте, в котором рассматривается линейный граф, состоящий из двух технологических операций (рис. 2), где исследуется формирование значения лишь одного свойства без учёта взаимовлияния других факторов.

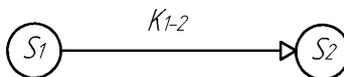


Рис. 2. Передача графа технологического наследования некоторого показателя качества  $S$

Значение условного показателя качества на второй технологической операции  $S_2$ , с учётом значения данного показателя на первой технологической операции  $S_1$ , а также коэффициента наследования  $K$ , можно выразить зависимостью вида [15]:

$$S_2 = \frac{1}{K_{1-2}} S_1. \quad (2)$$

Основываясь на данных рассуждениях, получение итогового значения показателя качества после четырёх технологических операций (рис. 3), с учётом коэффициентов

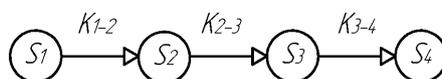


Рис. 3. Передача графа технологического наследования некоторого показателя  $S$

наследования  $K$ , а также значения, полученного на первой технологической операции  $S_1$ , может быть выражено следующей формулой:

$$S_4 = S_1 \cdot \left( \frac{1}{K_{1-2}} \cdot \frac{1}{K_{2-3}} \cdot \frac{1}{K_{3-4}} \right). \quad (3)$$

Обобщённая зависимость для определения итогового значения показателя качества, будет иметь вид:

$$S = S_1 \prod_{i=1}^n \frac{1}{k_i}, \quad (4)$$

где  $S$  — значение параметра, учитывающего эффект технологической наследственности от использования на какой-либо из операций технологического процесса инструмента, обработанного с применением диоксида хрома и сульфата железа;  $S_1$  — начальный параметр детали при начальной обработке без использования инструмента, обработанного с применением диоксида хрома и сульфата железа;  $k_i - k_1, k_2, k_3, k_4$  — коэффициенты технологического наследования, учитывающие применение на какой-либо из операций (или на всех) инструмента, обработанного с использованием диоксида хрома и сульфата железа.

**Результаты исследований.** Для достижения цели исследования по аналогии с рис.1 была составлена схема алгоритмов обработки отверстия 35Н7 (рис. 4), где жирным выделены операции, на которых применяется инструмент заточенный импрегнированными диоксидом хрома абразивным кругом с подачей СОТС с добавлением диоксида хрома и сульфата железа, на остальных – обычным заточным кругом.

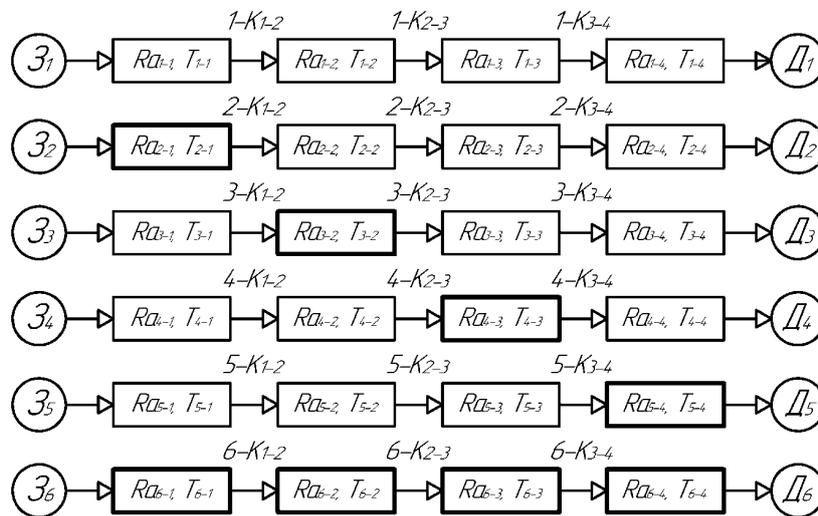


Рис. 4. Алгоритм проведения экспериментов наследования показателей обработки

Абразивная заточка свёрл по двум способам осуществлялась чашечными кругами типа 11 и характеристикой 175×20×32×3 25А 100L8 V 35 ГОСТ Р 52781-2007. Режимы абразивной заточки были приняты следующими: скорость вращения круга  $V_{кр} = 13,2$  м/с, поперечная подача стола  $S_{non} = 0,02$  мм/дв. ход.

В соответствии с алгоритмом на рис. 4 было проведено шесть экспериментов с замерах соответствующих величин. В исследовании использовались спиральные свёрла из быстрорежущей стали Р6М5 диаметром 32 мм, цельные зенкеры из быстрорежущей стали Р6М5 размером  $34,5_{-0,039}^{+0,039}$  мм с числом зубьев (спиральных канавок)  $z = 4$ , черновые развёртки из быстрорежущей стали Р6М5 размером  $34,8_{-0,08}^{+0,066}$  мм, и чистовые развёртки из быстрорежущей стали Р6М5 диаметром  $35_{+0,012}^{+0,021}$  мм. Для всех серий проведённых исследований была принята единая геометрия заточки свёрл:  $2\varphi = 118^\circ$ ,  $\psi = 54^\circ$ ,  $\alpha = 12^\circ$ ,  $B = 2,3$  мм; зенкеров:  $\gamma = 20^\circ$ ,  $\alpha = 8^\circ$ ,  $\varphi = 45^\circ$  при длине переходного конуса 2,5 мм с углом  $\varphi_0 = 5^\circ$ , развёрток черновых:  $\gamma = 8^\circ$ ,  $\alpha = 12^\circ$ ,  $\alpha_1 = 18^\circ$ , и чистовых:  $\gamma = 8^\circ$ ,  $\alpha = 6^\circ$ ,  $\alpha_1 = 12^\circ$  [18].

Предварительно в исследуемых образцах из котельной стали 12Х1МФ были просверлены сквозные отверстия диаметром 16 мм и длиной 30 мм. Рассверливание отверстий осуществлялось при скорости резания  $V = 0,59$  м/с ( $n = 355$  об/мин) и подаче  $S = 0,15$  мм/об. При зенкерования были приняты следующие режимы резания: глубина резания (припуск на обработку)  $t = 1,25$  мм; скорость резания  $V = 0,416$  м/с ( $n = 250$  об/мин); подача  $S = 0,3$  мм/об ( $S_z = 0,075$  мм/зуб). Развёртывание черновое проводилось на режимах:  $V = 0,16$  м/с ( $n = 90$  об/мин);  $S = 0,15$  мм/об. Развёртывание чистовое проводилось на режимах:  $V = 0,11$  м/с ( $n = 63$  об/мин);  $S = 0,1$  мм/об. Сверление (рассверливание), зенкерование и развёртывание (черновое/ чистовое) отверстий осуществлялось на вертикально-сверлильном станке модели 2Н135. В качестве смазочно-охлаждающего технологического средства (СОТС) использовался 5-процентный водный раствор эмульсола «Укринол-14».

В качестве основных показателей эффективности обработки отверстий инструментами, подвергнутыми различным способом заточки, были приняты шероховатость обработанной поверхности по параметру  $Ra$ , а также стойкость металлорежущих инструментов  $T$ .

За критерий износа всех режущих инструментов был принят критерий износа по периферии заборного конуса, равный  $h_3 = 1,2$  мм. Измерение износа производилось на инструментальном микроскопе БМИ-1М. Шероховатость обработанной поверхности образцов определялась по параметру  $Ra$  при помощи портативного профилометра *Surfjest SJ-210*.

Результаты измерений согласно графа технологического наследования (рис. 1) приведены в таблицах 1–3.

Таблица 1

Результаты измерения шероховатости обработанной поверхности  $Ra$ , мкм

№ алгоритма	Технологическая операция			
	Рассверливание	Зенкерование	Развёртывание черновое	Развёртывание чистовое
1	9,30	2,83	1,80	0,68
2	8,20	2,58	1,71	0,64
3	9,28	2,22	1,62	0,62
4	9,29	2,82	1,23	0,54
5	9,30	2,79	1,78	0,30
6	8,19	2,15	1,13	0,23

Для предварительной оценки стойкости инструмента  $T$  были проведены измерения величины износа  $h$ , полученные инструментами от обработки одного отверстия, результаты которых представлены в табл. 2.

В исследовании было принято допущение о линейном характере износа, при котором накопленная деформация за одну технологическую операцию не влияет на последующую. С учётом данного допущения определялось предельное количество обработанных отверстий по измеренному значению износа от обработки одного отверстия  $h$  и критерию износа  $h_3$ , по следующей зависимости:

$$N = \frac{h_3}{h}. \quad (5)$$

Таблица 2

Результаты измерения величины износа инструмента  $h$  за время обработки одного отверстия, мм

№ алгоритма	Технологическая операция			
	Рассверливание	Зенкерование	Развёртывание черновое	Развёртывание чистовое
1	0,017	0,0075	0,028	0,058
2	0,011	0,0069	0,026	0,054
3	0,016	0,0058	0,025	0,052
4	0,017	0,0075	0,021	0,045
5	0,017	0,0075	0,027	0,042
6	0,011	0,0053	0,018	0,037

Расчёт вероятной стойкости инструментов  $T$  выполнялся по следующей формуле:

$$T = N \cdot T_0, \quad (6)$$

где  $T_0$  — основное технологическое время в минутах, определяемое из соотношения:

$$T_0 = \frac{L}{n \cdot S}, \quad (7)$$

где  $L$  — длина обработки, мм;  $n$  — частота вращения шпинделя, об/мин;  $S$  — подача инструмента, мм/об.

Результаты расчёта стойкости  $T$  инструментов, участвующих в процессе обработки отверстия, мин

№ алгоритма	Технологическая операция			
	Рассверливание	Зенкерование	Развёртывание черновое	Развёртывание чистовое
1	23,6	42,5	63,3	68,9
2	35,9	46,5	68,6	73,6
3	24,1	54,3	71,0	75,5
4	23,8	42,5	83,6	88,4
5	23,4	42,5	63,6	95,7
6	35,9	60,1	94,1	107,5

Как видно из таблиц 1–3, применение заточки свёрл из быстрорежущей стали импрегнированными абразивными кругами с подачей в зону обработки йодосодержащей охлаждающей жидкости существенно снижает шероховатость рабочих поверхностей инструмента за счёт нивелирования микронеровностей, образовавшимися йодидами железа при одновременном снижении теплонапряжённости материала поверхностного слоя, что также способствует повышению стойкости инструмента.

Йодиды железа, обладающие слоистым строением и высокими антифрикционными свойствами, выступают в роли твёрдых смазок, снижающих силовую напряжённость в зоне обработки [16, 17].

Технологическая наследственность показателей качества от использования предлагаемого способа заточки, по-видимому, объясняется тем, что на поверхности инструмента в процессе заточки с применением диоксида хрома формируется слой йодидов железа, обладающих низким коэффициентом трения, который благодаря своей высокой адгезионной способности, сохраняется на участках инструмента, не затронутых износом режущего лезвия, и который может частично переноситься на ювенильные поверхности обрабатываемого материала в процессе резания, что способствует улучшению показателей качества инструмента и заготовки [12].

Таблица 4

Расчётные значения коэффициентов технологического наследования  $k_i$

№ алгоритма	Коэффициенты технологического наследования					
	Шероховатость $Ra$ , мкм			Стойкость $T$ , мин		
1	3,2862	1,5722	2,6471	0,5553	0,6714	0,9187
2	3,1783	1,5088	2,6719	0,7720	0,6778	0,9321
3	4,1802	1,3704	2,6129	0,4438	0,7648	0,9404
4	3,2943	2,2927	2,2778	0,5600	0,5084	0,9457
5	3,3333	1,5674	5,9333	0,5506	0,6682	0,6645
6	3,8093	1,9026	4,9130	0,5973	0,6387	0,8753

По результатам измерений в соответствии с рис. 2 были определены коэффициенты технологического наследования (табл. 4). Их анализ позволяет сделать предположение о том, что вычисленные коэффициенты наследования остаются постоянными в пределах некоторой области значений режимов резания и условий обработки, в связи с чем начальное значение показателя качества  $S_0$  можно выразить через модель четырёхфакторного эксперимента, где независимыми переменными будут скорость резания  $V$ , подача  $S$ , диаметр инструмента  $d$  и коэффициент способа заточки инструмента  $F$ , определяемый экспериментально. В результате были получены следующие математические модели, описывающие формирование параметра шероховатости  $Ra$  и стойкости инструмента  $T$  в процессе обработки отверстия:

для параметра шероховатости обработанной поверхности детали  $Ra$ :

$$\begin{aligned}
 1Ra_4 &= (K \cdot V^x \cdot S^y \cdot d^z \cdot F^n) \cdot \left( \frac{1}{3,2862} \cdot \frac{1}{1,5722} \cdot \frac{1}{2,6471} \right) | 2Ra_4 = (K \cdot V^x \cdot S^y \cdot d^z \cdot F^n) \cdot \left( \frac{1}{3,1783} \cdot \frac{1}{1,5088} \cdot \frac{1}{2,6719} \right) | 3Ra_4 = \\
 &= (K \cdot V^x \cdot S^y \cdot d^z \cdot F^n) \cdot \left( \frac{1}{4,1802} \cdot \frac{1}{1,3704} \cdot \frac{1}{2,6129} \right) | 4Ra_4 = (K \cdot V^x \cdot S^y \cdot d^z \cdot F^n) \cdot \left( \frac{1}{3,2943} \cdot \frac{1}{2,2927} \cdot \frac{1}{2,2778} \right) | 5Ra_4 = \\
 &= (K \cdot V^x \cdot S^y \cdot d^z \cdot F^n) \cdot \left( \frac{1}{3,3333} \cdot \frac{1}{1,5674} \cdot \frac{1}{5,9333} \right) | 6Ra_4 = (K \cdot V^x \cdot S^y \cdot d^z \cdot F^n) \cdot \left( \frac{1}{3,8093} \cdot \frac{1}{1,9026} \cdot \frac{1}{4,9130} \right),
 \end{aligned}$$

для стойкости инструмента  $T$ :

$$\begin{aligned}
 1T_4 &= (K \cdot V^x \cdot S^y \cdot d^z \cdot F^n) \cdot \left( \frac{1}{0,5553} \cdot \frac{1}{0,6714} \cdot \frac{1}{0,9187} \right) | 2 | T_4 = (K \cdot V^x \cdot S^y \cdot d^z \cdot F^n) \cdot \left( \frac{1}{0,7720} \cdot \frac{1}{0,6778} \cdot \frac{1}{0,9321} \right) | 3 | T_4 = \\
 &= (K \cdot V^x \cdot S^y \cdot d^z \cdot F^n) \cdot \left( \frac{1}{0,4438} \cdot \frac{1}{0,7648} \cdot \frac{1}{0,9404} \right) | 4 | T_4 = (K \cdot V^x \cdot S^y \cdot d^z \cdot F^n) \cdot \left( \frac{1}{0,5600} \cdot \frac{1}{0,5084} \cdot \frac{1}{0,9457} \right) | 5 | T_4 = \\
 &= (K \cdot V^x \cdot S^y \cdot d^z \cdot F^n) \cdot \left( \frac{1}{0,5506} \cdot \frac{1}{0,6682} \cdot \frac{1}{0,6645} \right) | 6 | T_4 = (K \cdot V^x \cdot S^y \cdot d^z \cdot F^n) \cdot \left( \frac{1}{0,5973} \cdot \frac{1}{0,6387} \cdot \frac{1}{0,8753} \right).
 \end{aligned} \quad (8)$$

Однако для определения области режимов и условий обработки ( $V_{min}$ ,  $V_{max}$ ,  $S_{min}$ ,  $S_{max}$ ,  $d_{min}$ ,  $d_{max}$  и коэффициента способа заточки  $F$ ) единства коэффициентов наследования необходимо проведение дополнительных экспериментальных исследований.

**Заключение.** Таким образом, результаты выполненных исследований позволяют сделать вывод об эффективности использования инструмента, подвергнутого заточке импрегнированным диоксидом хрома абразивным кругом с подачей йодосодержащей СОТС, вследствие эффекта технологической наследственности, заключающегося в частичном переносе слоя йодидов железа с поверхности инструмента на ювенильную поверхность обрабатываемой заготовки в процессе резания, что снижает коэффициент трения при дальнейшей обработке отверстия инструментом, независимо от способа его заточки. Однако, чем большее количество инструментов, участвующих в процессе обработки отверстия, подвергалось заточке с применением диоксида хрома, тем выше оказывались итоговые показатели качества обработанной поверхности, а инструменты обладали наибольшим периодом стойкости, что говорит о повышении технологической наследственности показателей качества заготовки и инструмента.

Составленные математические модели могут быть использованы для прогнозирования выходных данных при многооперационной обработке отверстий в деталях с применением заточки металлорежущего инструмента импрегнированным диоксидом хрома абразивным кругом с подачей в зону обработки йодосодержащей СОТС.

#### Список литературы

1. Ящерицын П.И., Рыжов Э.В., Аверченко В.И. *Технологическая наследственность в машиностроении*. Минск: Наука и техника; 1977. 256 с.
2. Дальский А.М. *Технологическое обеспечение надёжности высокоточных деталей машин*. Москва: Машиностроение; 1975. 223 с.
3. Маркарян Г.К. Технологическая наследственность при образовании поверхности закалённых деталей машин. *Физика резания металлов*. 1971;(1):63–68.
4. Маталин А.А. *Технологические методы повышения долговечности деталей машин*. Киев: Изд-во «Техника»; 1971. 142 с.
5. Ящерицын П.И. *Технологическая наследственность и эксплуатационные свойства шлифованных деталей*. Минск: Наука и техника; 1971. 210 с.
6. Хейфец, М.Л. *Проектирование процессов комбинированной обработки*. Москва: Машиностроение; 2005. 272 с.
7. Хейфец М.Л., Васильев А.С., Клименко С.А., Танович Л. Технологическая наследственность в процессах производства и реновации изделий. *Инженер-механик*. 2015;(2):8–13.
8. Блюменштейн В.Ю. Механика технологического наследования как научная основа проектирования сложнопрофильных инструментов для упрочняющей обработки поверхностным пластическим деформированием. *Наукоёмкие технологии в машиностроении*. 2017;(8):7–16.
9. Суслов А.Г. *Инженерия поверхности деталей*. Москва: Машиностроение; 2008. 320 с.
10. Смелянский В.М. *Механика упрочнение деталей поверхностным пластическим деформированием*. Москва: Машиностроение; 2002. 300 с.
11. Нагоркин М.Н. Оценка влияния технологической наследственности на процесс формирования параметров качества поверхностей деталей алмазным выглаживанием. *Вестник Воронежского государственного технического университета*. 2019;15(5):122–126
12. Бутенко В.И., Кадач Р.Г. Исследование эффективности способов заточки металлорежущих инструментов из быстрорежущей стали. В: *Труды научно-технической конференции, посвященной памяти заслуженного деятеля науки и техники Российской Федерации, доктора технических наук, профессора А.А. Рыжкина «Современные тенденции развития инструментальных систем и металлообрабатывающих комплексов»*. Ростов-на-Дону, 20 января 2023 года. Ростов-на-Дону: ДГТУ; 2023. С. 96-101. URL: <https://ntb.donstu.ru/content/2023265> (дата обращения: 03.03.2025).
13. Васильев А.С., Дальский А.М., Клименко С.А. и др. *Технологические основы управления качеством машин*. Москва: Машиностроение; 2003 256 с.
14. Ящерицын П.И., Хейфец М.Л., Клименко С.А., Васильев А.С. Технологическое и эксплуатационное наследование показателей качества в жизненном цикле изделий машиностроения. *Доклады НАН Беларуси*. 2004;48(4):107–110.

15. Дальский А.М., Базров Б.М., Васильев А.С., Дмитриев А.М., Колесников А.Г., Кондаков А.И., Шачнев Ю.А. *Технологическая наследственность в машиностроительном производстве*. Дальский А.М. (ред.). Москва: Изд-во МАИ; 2000. 364 с.

16. Бутенко, В.И. *Применение йода и его соединений в процессах обработки и эксплуатации деталей машин*. Ростов-на-Дону: Изд. Центр ДГТУ; 2023. 242 с.

17. Латышев В.Н., Наумов А.Г., Раднюк В.С., Тимаков А.С., Корчагин А.В. Применение йода как компонента СОТС при резании металлов. *Металлообработка*. 2008;(3(45)):9–14.

18. Вереина Л.И. *Справочник токаря*. Учебное пособие для нач. проф. Москва: Издательский центр «Академия»; 2004. 448 с.

***Об авторах:***

**Роман Геннадьевич Кадач**, аспирант кафедры технологии машиностроения Донского государственного технического университета (344003, Российская Федерация, г. Ростов-на-Дону, пл. Гагарина, 1), [rkad925@mail.ru](mailto:rkad925@mail.ru)

**Виктор Иванович Бутенко**, доктор технических наук, профессор, профессор кафедры технологии машиностроения Донского государственного технического университета (344003, Российская Федерация, г. Ростов-на-Дону, пл. Гагарина, 1), [butenkowiktor@yandex.ru](mailto:butenkowiktor@yandex.ru)

***Конфликт интересов:*** авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

***Все авторы прочитали и одобрили окончательный вариант рукописи.***

***About the Authors:***

**Roman G. Kadach**, Postgraduate Degree Student of the Mechanical Engineering Technology Department, Don State Technical University (1, Gagarin Sq., Rostov-on-Don, 344003, Russian Federation), [rkad925@mail.ru](mailto:rkad925@mail.ru).

**Viktor I. Butenko**, Dr. Sci. (Engineering), Professor of the Mechanical Engineering Technology Department, Don State Technical University (1, Gagarin Sq., Rostov-on-Don, 344003, Russian Federation), [butenkowiktor@yandex.ru](mailto:butenkowiktor@yandex.ru)

***Conflict of Interest Statement:*** the authors declare no conflict of interest.

***All authors have read and approved the final manuscript.***