

**Ключевые слова:**

эффективность оптимального резания, оптимальная скорость резания, экономическая стойкость инструмента, режимы резания, оптимальная температура резания, интенсивность износа, стойкость инструмента

# РОЛЬ СКОРОСТИ РЕЗАНИЯ И РАДИУСА ОКРУГЛЕНИЯ РЕЖУЩЕГО КЛИНА В ЭФФЕКТИВНОСТИ ТОНКОЙ МЕХАНИЧЕСКОЙ ОБРАБОТКИ ТРУДНООБРАБАТЫВАЕМЫХ МАТЕРИАЛОВ

## ЧАСТЬ 2

**Юрий РАКУНОВ, Валерий АБРАМОВ, Александр РАКУНОВ**

Рассмотрены научно-технические подходы к проблеме определения скорости резания при механической обработке рабочих поверхностей деталей машин и изделий унифицированным инструментом на токарных станках с ЧПУ. Произведено сопоставление оптимальных температур резания, полученных при точении сталей, с температурами их структурно-фазовых  $\alpha$ - $\gamma$ -превращений. Показано, что закон постоянства оптимальной температуры резания обеспечивает максимальную стойкость инструмента, наивысшую точность обработки при оптимальной скорости резания как для конструкционных, так и труднообрабатываемых материалов.

Знание **оптимальных скоростей резания** ( $V_o$ ) является совершенно необходимым для техниче-ски грамотной и эффективной эксплуатации уни-фицированного режущего инструмента (УРИ) в многообразных условиях его применения. Таким образом, использование  $V_T$  позволяет исключать все еще имеющиеся на практике случаи непра-вильной (или преднамеренной), технически неграмотной эксплуатации инструмента, когда в погоне за высокой стойкостью РИ на производ-стве в ряде случаев используют заниженные ско-рости резания  $V_T$  [6, 7] (см. табл. 2). К сожалению,

в погоне за производительностью часто жертвуют стойкостью инструмента, назначая завышенную скорость резания  $V_T$ , соответствующую по давно устаревшей и несправедливой формуле Ф. Тейлора произвольно выбранному периоду стойкости  $T_{\Sigma}$  [3–6]. При этом повышение производи-тельности на 33–46% приводит к снижению стойкости в 4–6 раз [6, 14], что недопустимо, как по причине низкого качества обработки, так и высокой инструментоемкости процесса, частоты смены и наладки РИ, что нарушает режим станков с ЧПУ «настройки и коррекции размеров» обрабаты-ваемых поверхностей деталей и приводит к эконо-мическим потерям [10, 14].

\* Начало см.: СТАНКОИНСТРУМЕНТ, 2020, № 1, с. 66.

С этой точки зрения весьма показательным является пример, приведенный в статье, которую написал Патрик де Вос (Patrick de Vos) – управляющий по корпоративному техническому обучению компании Seco Tools [11]. «Упрощенный пример непредвиденного взаимодействия факторов обработки: при обработке детали 2 мин требуется на резание и 2 мин – на загрузку и разгрузку заготовки. На смену РИ уходит 1 мин; период стойкости инструмента  $T = 10$  мин – пять заготовок, то есть время индексации инструмента (настройки на размер) составляет 0,2 мин на деталь. Для каждой детали требуется 4,2 мин времени обработки, следовательно, производительность немного превышает 14 заготовок в час. Стоимость РИ составляет 15 евро, а его стойкость, равная пяти заготовкам, означает, что для производства 14 заготовок требуется 2,8 инструмента (стоимость – 42 евро). Стоимость станка – 50 евро в час. Итого стоимость производства 14 заготовок за 1 ч составляет 92 евро. Затем, пытаюсь ускорить выработку и производительность, цех увеличивает  $V$  на 10%. Это сокращает время резания на 10% (до 1,8 мин), но при этом снижает стойкость инструмента примерно вдвое. Это значит, что одна режущая кромка обработает только 2,5 заготовки до того, как потребуются индексация. Время индексации РИ по-прежнему составляет 1 мин, загрузка/разгрузка заготовки – 2 мин. Время производства одной заготовки остается 4,2 мин (1,8 мин резания, 2 мин перемещения заготовки и 0,4 мин индексации инструмента) или 14 заготовок в час. Стоимость станка и РИ неизменны, поэтому требуется использовать в час 5,6 инструмента (стоимость – 84 евро). Несмотря на попытку повысить производительность, время обработки 14 заготовок остается прежним, а затраты повышаются с 92 до 134 евро (в 1,45 раза)! В данном случае увеличение  $V$  не повышает производительность перехода. Изменение времени резания влияет на другие факторы в системе обработки: в данном примере – на стойкость и время индексации РИ. Поэтому, цех должен тщательно учитывать все последствия изменений процесса».

Другая форма скрытых затрат включает выполнение вспомогательных переходов в процессе. Например, на многих предприятиях классическим примером скрытых затрат является время, затраченное на индексацию сменных пластин. Время, отводимое на индексацию пластины, может составлять 1 мин. Однако время, фактически измеряемое в производственном помещении на рабочем месте, может быть на 2, 3 или 10 мин больше, что означает разницу от 60 до 600 с в зависимости от точности размеров детали (заготовки), особен-

но, при финишной контурной обработке нескольких точных поверхностей за один установ в одном переходе (одним РИ).

Зарубежные исследователи еще в 1960–70-х годах 20-го столетия убедились в несправедливости формулы Ф. Тейлора, которая не дает точного выражения зависимости  $T = f(V)$  при стойкостях РИ меньших 120 мин. Соответствующие ей формулы экономических стойкости  $T_{\text{э}}$  и скорости резания  $V_{\text{э}}$  неверны. Их использование дает очень малые экономические стойкости. Поэтому была предложена зависимость  $T-V$ , которая выражается формулой:

$$V(C + T) = L,$$

где  $C$  – постоянная для данной пары материалов (обрабатываемый-инструментальный). Эта формула более точно определяет  $T_{\text{э}}$  в диапазоне 120–10 мин [4, 5, 21].

Важно отметить, что как снижение, так и повышение скоростей резания по сравнению с оптимальными  $V_0$  приводит к значительному повышению интенсивности износа и снижению размерной стойкости инструмента. Например, полуторакратное повышение скоростей резания по сравнению с  $V_0$  при чистовом точении стали 12X18H10T унифицированными резцами Т30К4 на подачах (0,1–0,15) мм/об приводит к более чем двадцатикратному снижению размерной стойкости, а уменьшение  $V$  в два раза по сравнению с оптимальными в ряде случаев вызывает снижение размерной стойкости в 6–36 раз. Использование параметрических уравнений максимальной размерной стойкости во многих случаях позволяет повысить размерную стойкость инструмента (в 1,15–3,34 раза) при одновременном повышении производительности обработки (в 1,17–2,57 раза) и снизить себестоимость изготовления деталей (в 1,19–2,56 раза) по сравнению с нормативными данными [3, 6, 14, 20].

Для определения оптимальных  $V_0$  обычно проводят стойкостные исследования на 6–8 скоростях резания, и скорость резания, при которой обеспечивается максимальная размерная стойкость РИ или наименьшая интенсивность его износа, и принимают за оптимальную –  $V_0$ . Этот метод определения  $V_0$  является достаточно надежным, но обладает очень высокой трудоемкостью и требует большого расхода исследуемых на обрабатываемость материалов.

Использование же оптимальной температуры резания  $\theta_0$ , являющейся физической константой обрабатываемого материала, позволяет определять  $V_0$  для любых видов обработки лишь на основе температурных исследований без поста-

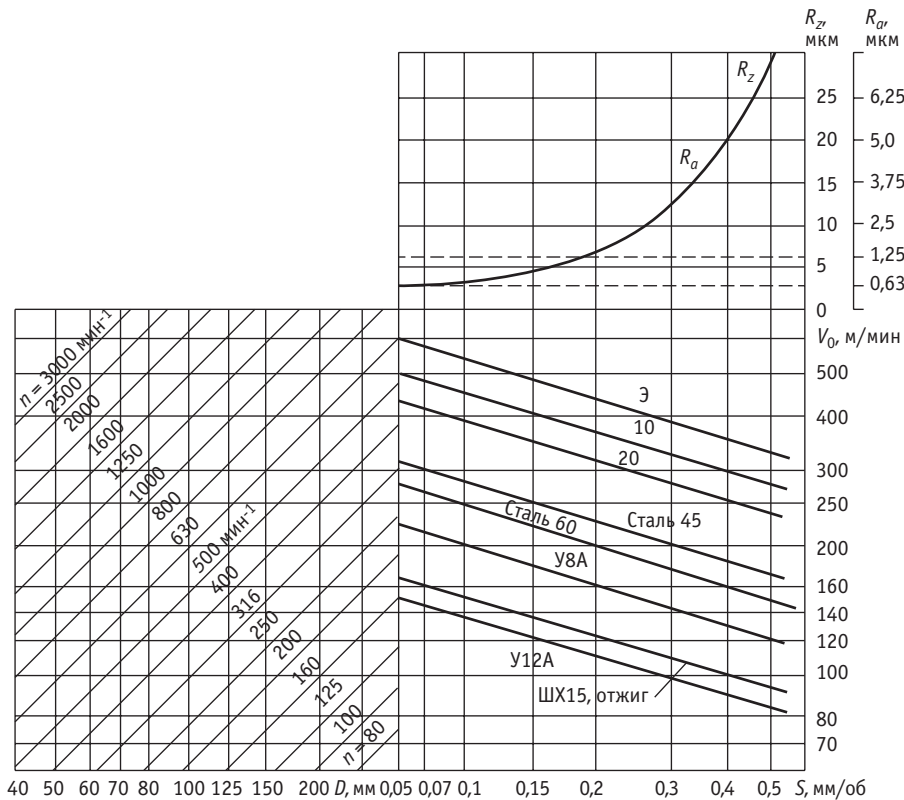


Рис. 4. Номограмма выбора режимов резания при точении углеродистых сталей и ШХ15 (отжиг: НВ 204) УРИ с РЭ из т/с Т15К6 ( $\gamma = 10^\circ$ ;  $a = \alpha_1 = 15^\circ$ ;  $\phi = 45^\circ$ ;  $\phi_1 = 15^\circ$ ;  $R = 0,5$  мм;  $t = 1$  мм)

новки и организации трудоемких стойкостных испытаний [6, 7, 10, 14, 15].

Для облегчения практического использования возможностей быстрого подбора режимов оптимального резания (РОР) в производственных условиях разработаны специальные номограммы [6, 14, 24], в основе которых лежат параметрические уравнения максимальной размерной стойкости, данные о высоте неровностей обработанной поверхности при оптимальных сочетаниях  $V$  и  $S$ , а также экономические расчеты (рис. 4).

Описанные способы послужили методической и технологической базой для разработки первичной подсистемы многоуровневой базовой технологии и способствовали созданию подсистемы синтеза переходов, позиций и установов токарной групповой технологии в условиях серийного и мелкосерийного многономенклатурного производства [6, 14–16].

Номограммы позволяют по заданной высоте неровностей обработанной поверхности и принятой величине радиуса сопряжения задних поверхностей реза определить максимально допустимую величину подачи  $S_K$ . Работа на подачах  $S > S_K$  не обеспечит требуемой чистоты обработки, а на подачах  $S < S_K$  нерациональна, так как снижает производительность труда, повышает себестоимость обработки и поверхностный относительный износ (т. е. снижает точность обработ-

ки), а также увеличивает расход УРИ. Номограммы избавляют рабочего и нормировщика, технолога и конструктора при выборе оптимального режима резания от власти случайного выбора, приводящего обычно к непредсказуемым результатам [3–6]. Подобные номограммы необходимы при проектировании автоматических линий, где скорости рабочих движений устанавливаются неизменными. Также они необходимы для успешной разработки управляющих программ для станков с ЧПУ [24]. Номограммы наглядно показывают, что при соблюдении постоянно оптимальной температуры резания повышение подачи (в диапазоне, характерном для полустогового, чистового и тонкого точения) всегда повышает не только производительность обработки, но и размерную стойкость УРИ, а, следовательно, точность и качество обрабатываемых поверхностей ответственных деталей (см. рис. 5).

При оптимальных скоростях резания, обеспечивающих отсутствие нароста, устойчивое резание возможно при отрицательных  $\gamma$ , но не более  $45^\circ$ . В точке  $i$  (т. В на рис. 1) поток металла раздваивается: часть его течет по передней поверхности РЭ, а часть – по задней, деформируясь при этом и упрочняясь [12–14]. Очевидно, что чем больше  $\rho$ , тем больше должна быть величина  $\alpha_i$ , при этом оптимальное соотношение  $a_i/\rho$  можно считать равным 3–4 [1, 6, 14, 15].

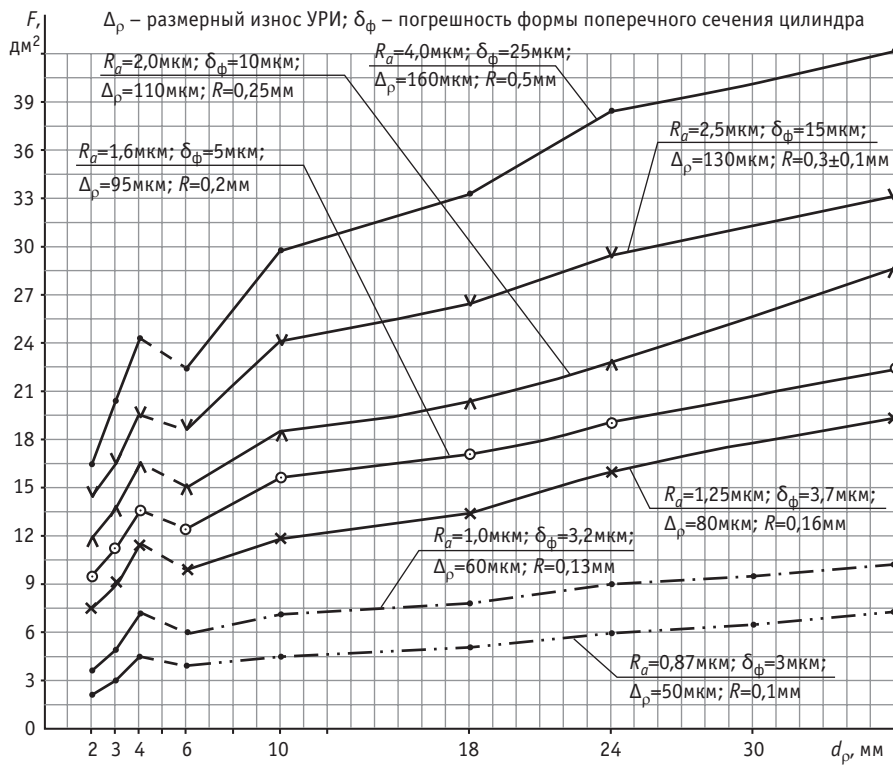


Рис. 5.

Зависимость площади обработанной поверхности определенного качества, полученного финишным точением на станке с ЧПУ высокой точности унифицированными РИ типоразмеров: 02Цв, 03Цв, 04Цв; 06Цт, 10Цт, 18Цт, 24Цт, 36Цт при условии экономической стойкости на оптимальной скорости резания (при оптимальной температуре резания). Пара материалов: сталь 12Х18Н10Т–ВК60М. Режимы резания назначены по таблицам-матрицам первичной подсистемы многоуровневой базовой технологии [15],  $\Delta_p$  – размерный износ УРИ;  $\delta_\phi$  – погрешность формы поперечного сечения цилиндра

В действительности на практике при величине  $\rho$ , соизмеримой с толщиной срезаемого слоя  $\alpha$  металла, процесс стружкообразования происходит даже при отрицательных передних углах. Величина отрицательного переднего угла может быть рассчитана следующим образом:

$$|-\gamma| = \arcsin(1 - a_i / \zeta), \quad (4)$$

где  $a_i$  – толщина среза в точке  $i$ ;  $\zeta$  – коэффициент усадки стружки.

Из этого равенства при  $\rho = 10$  мкм и  $a_i = 5$  мкм, величина переднего угла  $\gamma_i = -30^\circ$ . Несмотря на большие отрицательные передние углы, процесс стружкообразования при обработке эластичных материалов происходит устойчиво при достаточной жесткости системы ЗИПС (заготовка – инструмент – приспособление – станок) даже при весьма малых толщинах среза. Например, устойчивый процесс резания на скоростях 5÷6 м/мин при протягивании возможен с толщиной среза  $a = 2$  мкм [8].

Для достоверной экспериментальной проверки УРИ проведена обработка безцентрошлифованных нагартованных прутковых заготовок  $\varnothing 10,5\text{-В-}h10\text{-Н-}9\text{ХС}$  длиной 2,5 м на токарном автомате продольного точения с ЧПУ Tornos ENC264. Партии по 600 шт. деталей типа «Толкатель»  $\varnothing 7,5h7_{(-0,012)}$  с переходом на  $\varnothing 8,2_{-0,1}$  общей длиной

47,2 $_{-0,05}$  мм обтачивали на режимах, рекомендованных TP 1 80050-90 для труднообрабатываемых материалов [12–14, 15, 19].

Унифицированные резцы 2105-0026 для наружной обработки с механическим тангенциально-клеммовым креплением цилиндрических стержневых (проволочных) многократно перетачиваемых РЭ с продольной радиусной канавкой или накладным стружколомом в режиме максимальной стойкости обеспечивают качество обработанной поверхности  $\varnothing 7,5h7$  (разброс в партии деталей 613 шт. – 10 мкм при шероховатости  $Ra < 1,25$  мкм), при этом стойкость резца составляет 1000 мин (16,67 ч) до переточки, что соответствует ресурсостойкости  $F/\Delta p = 23,3/3,7 = 6,27$  дм<sup>2</sup>/мкм до ввода коррекции в 5 мкм и  $F_{п}/\Delta p_{п} = 47,94/7,5 = 6,39$  дм<sup>2</sup>/мкм до переточки.

Эти значения превышают стойкость паяных нормализованных резцов в 3,5÷10 раз (из-за разброса в параметрах стойкости паяных резцов). По сравнению с паяными резцами фирмы Precitool (Швейцария) ресурсостойкость повышается в 1,8÷2 раза по критерию «интенсивность размерного износа на единицу площади обработанной поверхности заданного качества», то есть мкм/дм<sup>2</sup>. Ресурсостойкость наружного резца 2105-0016 на станке Tornos-ENC164 составила  $57,94/7 = 8,28$  дм<sup>2</sup>/мкм, что превышает этот показатель для паяного резца фирмы Precitool –  $36,32/30 = 1,21$  дм<sup>2</sup>/мкм – в 6,8 раза. Эти данные



подтверждены актами внедрения [12, 13]. Ресурсо-стойкость отрезного резца 2139-0016 составила в длине отрезки  $l_p = 41,88$  дм – при отрезке заготовок, и  $6,26$  дм<sup>2</sup> – при торцовке, что в 8,3 раза больше, чем у паяных нормализованных резцов.

В заключение необходимо отметить, что, основываясь на физических причинах появления оптимальных температурных зон при резании всех конструкционных сталей и жаропрочных сплавов, способах определения оптимальных скоростей резания разработаны методы направленного формирования свойств новых обрабатываемых материалов при обработке резанием. Внедрение указанных методов в производство высокотехнологичных изделий оказывается весьма эффективным. Детали, обработанные на  $V_0$ , как показали многочисленные исследования, имеют более высокую жаропрочность, длительную прочность, коррозионную стойкость и износостойкость по сравнению с деталями, обработанными на более низких или более высоких скоростях резания. Работа на режимах оптимального резания приводит к достижению наиболее высокой точности чистой и финишной обработки конструкционных и труднообрабатываемых материалов и повышает надежность ее обеспечения на автоматизированном оборудовании и станках с ЧПУ.

Радиус округления режущего клина  $\rho$ , шероховатость режущих поверхностей и кромок, геометрия резцов принципиально важны при финишном точении, так как определяют минимально возможное сечение среза. Твердосплавные УРИ, заточенные и доведенные алмазными кругами и пастами, обеспечивают радиус округления в пределах 2–5 мкм, что дает на 40–50% меньшую шероховатость и большую размерную стойкость (в 2–3 и более раз), чем резцы, заточенные без последующей доводки [13–15]. Особенно эта разница наблюдается при сравнении с резцами, оснащенными неперетачиваемыми сменными пластинами [4, 5, 20, 21]. Импортозамещение инструмента должно заключаться в замене покупного МРИ на УРИ при соответствующей организации его серийного производства на основе проведенных разработок [9, 12–17].

## ЛИТЕРАТУРА

1. **Волгарев Л. Н.** Исследование некоторых вопросов оптимального резания при тонком точении жаропрочных материалов: Автореф. дисс... к.т.н. – М.: МАМИ, 1970. 23 с.
2. **Захарченко И. П.** Основы алмазной обработки твердосплавного инструмента. – Киев: Наукова думка, 1981. 300 с.
3. **Звонцов И. Ф., Иванов К. М., Серебrenицкий П. П.** Разработка управляющих программ для станков с ЧПУ: Учебное пособие / 2-е изд., стер. – СПб: Издательство «Лань», 2018. 588 с. (Учебники для вузов. Специальная литература).
4. **Klocke F.** Manufacturing Processes. Cutting. Springer, 2011. 500 p.
5. Machining: fundamentals and recent advances / Ed. J. Paulo Davim. Springer, 2008. 361 p.
6. **Макаров А. Д.** Оптимизация процессов резания. – М.: Машиностроение, 1976. 278 с.
7. **Макаров А. Д., Самигуллин Р. З.** О связи оптимальных температур резания с температурами структурно-фазовых превращений в обрабатываемых материалах // Межвуз. науч. сб. – Уфа: УАИ, 1981, вып. 6. Оптимизация процессов резания жаро- и особопрочных материалов.
8. **Маргулис Д. К.** Роль нароста при протягивании с малыми подачами // Станки и инструмент. 1960. № 12. С. 14–18.
9. **Ракунов Ю. П., Хрульков В. А., Золотова Н. А., Тихонов Н. А.** Многократно перетачиваемый резец: Патент РФ № 2226453. – Бюл. № 10, 2004.
10. **Безъязычный В. Ф., Кожина Т. Д., Константинов А. В. и др.** Оптимизация технологических условий механической обработки деталей авиационных двигателей. – М.: Изд-во МАИ, 1993. 184 с.
11. **Патрик де Вос (Patrick de Vos).** Десять простых шагов для максимального увеличения эффективности и производительности // Машиностроитель. 2017. № 3. С. 40–47.
12. **Ракунов Ю. П., Абрамов В. В., Золотова Н. А.** Прогрессивные конструкции и технологические процессы изготовления унифицированных твердосплавных резцов к станкам с ЧПУ // Станочный парк. 2011. № 5. С. 71–75.
13. **Ракунов Ю. П., Абрамов В. В.** Аналитический метод определения сил резания при тонкой механической обработке // Перспективные научные исследования. Мат-лы междунар. конф. Изд-во: Бял ГРАД-БГ (г. София, Болгария) 17-25.02.2014.
14. **Ракунов Ю. П.** Управление качеством токарной обработки высокоточных деталей машин // Научные технологии в машиностроении. 2013. № 2. С. 36–48.
15. **Ракунов Ю. П.** Первичная подсистема многоуровневой базовой технологии // Научные технологии в машиностроении. 2012. № 3. С. 23–31.
16. **Ракунов Ю. П.** Подсистема синтеза многоуровневой базовой технологии // Научные технологии в машиностроении. 2012. № 10. С. 36–46.

17. Резец: Патент РФ № 2170160 / Калмыков В. И., Ракунов Ю. П., Хрульков В. А., Петровская Т. М., Золотова Н. А., Борисенко Н. Н. — Бюл. № 19, 2001.
18. **Реченко Д. С.** Повышение эффективности твердосплавного лезвийного инструмента путем сверхскоростного затачивания и разработки комплекса условий его эксплуатации // Автореф. дисс. д.т.н. Томск, 2018. 37 с.
19. **Рыкунов А. Н.** Повышение эффективности тонкого точения исходя из достижимых показателей качества деталей и технологических возможностей процессов: Автореф. дисс. ... д.т.н. — М.: МГТУ «СТАНКИН», 1999. 30 с.
20. Sandvik Coromant. Рекомендации по режимам резания. Токарная обработка. <http://www.coroguide.com/CuttingDataModule/CDMTurning.asp> (дата обращения 24.12.2018).
21. **Shaw M. C., Crowell J. A.** Finish machining. Ann. C.I.R.P., 1965, 13, No. 1, 5–21, Discuss.
22. **Хаэт Г. Л., Василюк Г. Д.** Влияние округления режущей кромки твердосплавных резцов на их прочность и износостойкость // Вестник машиностроения. 1970. № 4. С. 71–73.
23. **Янюшкин А. С., Лобанов Д. В., Кузнецов А. М., Стилдзан М. В.** Анализ методов определения радиуса округления режущей кромки // Труды Братского гос. Ун-та: Серия «Естественные и инженерные науки». Т. 2. Братск: БрГУ, 2006. С. 256–260.
24. **Ракунов Ю. П., Абрамов В. В., Ракунов А. Ю.** Номограммы выбора подач и скоростей резания исходя из требуемой шероховатости обработки и износа унифицированных резцов // Школа Науки. 2019. № 11(22). С. 7–12.

**РАКУНОВ Юрий Павлович** – кандидат технических наук, доцент, Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет

**АБРАМОВ Валерий Васильевич** – доктор технических наук, профессор, Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет

**РАКУНОВ Александр Юрьевич** – инженер, Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет

## КНИГИ ИЗДАТЕЛЬСТВА «ТЕХНОСФЕРА»



Цена 840 руб.

### ЭТАЛОНЫ И СТАНДАРТНЫЕ ОБРАЗЦЫ В ИЗМЕРИТЕЛЬНОЙ ТЕХНИКЕ. ЭЛЕКТРОРАДИОИЗМЕРЕНИЯ Лукашкин В. Г., Булатов М. Ф.

М.: ТЕХНОСФЕРА,  
2018. – 402 с.  
ISBN 978-5-94836-512-1

Издание осуществлено при финансовой поддержке Федерального агентства по печати и массовым коммуникациям в рамках Федеральной целевой программы «Культура России (2012–2018 годы)»

В книге рассмотрены общие вопросы метрологического обеспечения и единицы физических величин. Изложены основные задачи технических средств метрологического обеспечения в области электрорадиоизмерений. Даны оценки погрешности и неопределенности первичных и рабочих эталонов.

Книга может быть полезна студентам и аспирантам при выборе и обосновании эталонной базы в области электрорадиоизмерений, а также специалистам, занимающимся вопросами разработки, производства и оценки качества средств измерений, контроля и испытаний.

#### КАК ЗАКАЗАТЬ НАШИ КНИГИ?

☎ 125319, Москва, а/я91; ☎ +7 495 234-0110; ☎ +7 495 956-3346; ✉ [knigi@technosphera.ru](mailto:knigi@technosphera.ru), [sales@technosphera.ru](mailto:sales@technosphera.ru)