

**Ключевые слова:**

оптимальная температура и скорость резания, унифицированный режущий инструмент, режимы оптимального резания, интенсивность относительного поверхностного износа, показатели качества

КРИТЕРИИ ОБРАБАТЫВАЕМОСТИ ТРУДНООБРАБАТЫВАЕМЫХ МАТЕРИАЛОВ, ОПТИМИЗАЦИЯ ИНСТРУМЕНТА И РЕЖИМОВ РЕЗАНИЯ В ПРЕЦИЗИОННОМ ГРУППОВОМ ПРОИЗВОДСТВЕ

Юрий РАКУНОВ, Валерий АБРАМОВ, Александр РАКУНОВ

Рассмотрены технические подходы к проблеме определения подач и скоростей резания, обеспечивающих минимальную интенсивность размерного износа резцов при токарной обработке рабочих поверхностей деталей машин и приборов твердосплавным унифицированным инструментом на универсальных станках, автоматах продольного точения и станках с ЧПУ. Представлена методика назначения подач и оптимальных скоростей резания по таблицам-матрицам.

ВВЕДЕНИЕ. ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ ПРЕДПОСЫЛКИ ИССЛЕДОВАНИЯ

До настоящего времени основной характеристикой обрабатываемости сталей и сплавов, а также труднообрабатываемых материалов (ТОМ) резанием, в частности точением, является скорость резания V_T , соответствующая выбранному, заданному периоду стойкости T [1, 2].

В то же время, теоретически обосновано, доказано [4] и экспериментально подтверждено [3–6], что за основные критерии обрабатываемости необходимо принимать оптимальную скорость резания V_O , соответствующую оптимальной температуре в зоне резания θ_O , и величину оптимального поверхностного относительного износа $h_{опО}$ (мкм/дм²). Эти критерии по сравнению с V_T обладают рядом неоспоримых объективных преимуществ.

1. Оптимальная скорость резания V_O соответствует критической точке (минимуму) на кривой $h_{оп} = f(V)$, в то время как V_T ни с какой критической точкой зависимости $T = f(V)$ не связана.

2. V_O при работе на различных подачах S для данной пары материалов (обрабатываемого (ОМ)

и инструментального (ИМ)) и унифицированном режущем инструменте (УРИ) соответствует постоянная θ_O , в то время как V_T для разных S в общем случае не соответствуют постоянные температуры резания.

Зависимость, приведенная на рис. 1, подтверждает справедливость положения о постоянстве θ_O при точении стали 13X14H3B2ФР (ЭИ736) унифицированным наружным резцом с режущим элементом (РЭ) из твердого сплава Т14К8 (рис. 2).

Исследования показывают, что $T = \text{const}$ при различных комбинациях V и S не соответствует θ_O или постоянной величине термоэлектродвижущей силы E (ТЭДС). Разность в величине ТЭДС (ΔE) для различных сочетаний V и S (при $T = \text{const}$) колеблется от 0,9 до 1,56 мВ, что эквивалентно изменению $V - \Delta V$ (при $S = 0,2$ мм/об) на (28–98)%. При этом необходимо отметить, что θ_O для различных комбинаций V и S также не соответствуют постоянные T . Так, при $E = 14,5$ мВ, в случае точения стали 12X18H10T резцом ВК3, период стойкости T колеблется от 17 до 70 мин для различных сочетаний V и S , а при точении этой стали резцом ВК6М (при $E = 14,0$ мВ) – T колеблется от 45 до 100 мин.

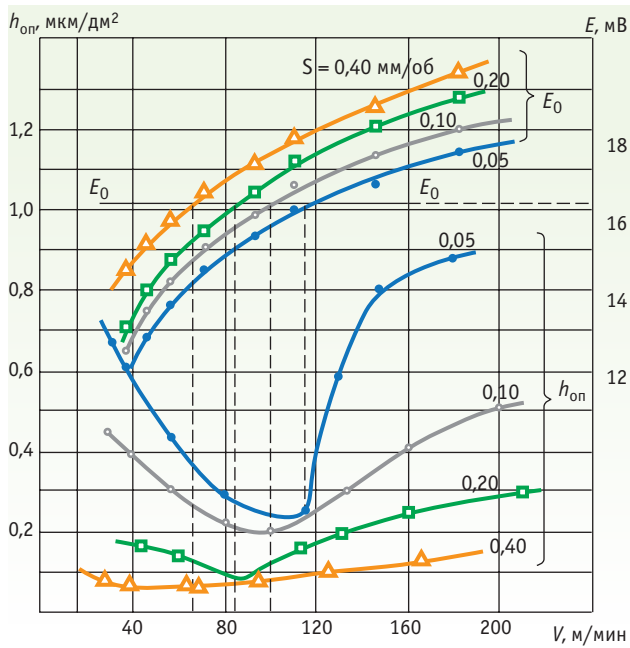


Рис. 1. Влияние V на величину ТЭДС и $h_{он}$, $t = 1$ мм

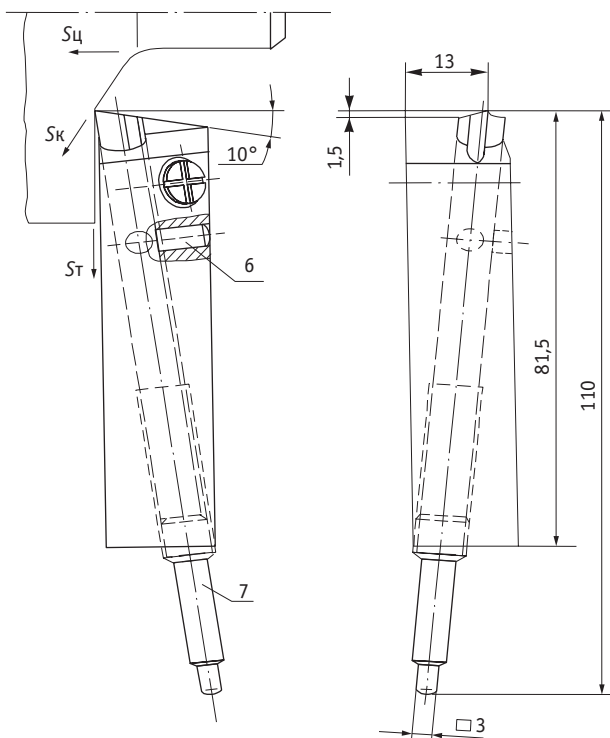


Рис. 2. Резец унифицированный наружный (РУН): режущий элемент (РЭ) составной, $\varnothing 7$ мм из т/с Т14К8; державка 20×20 мм, $\varphi = 95^\circ$, $\varphi_1 = 10^\circ$, $\gamma = 15^\circ$, $\alpha = \alpha_1 = 10^\circ$, радиус округления режущей кромки $\rho = 5 \dots 8$ мкм для РЭ, заточенных и доведенных алмазными кругами; $\rho = 3 \dots 5$ мкм для РЭ, доведенных алмазными пастами после тонкой заточки алмазными кругами

3. На основе ТЭДС, зафиксированной при V_0 , можно надежно осуществлять автоматическое управление процессом (АУП) обработки на режимах оптимального резания (РОР), то есть на режимах, обеспечивающих максимум размерной стойкости РИ и точности токарной групповой обработки.

АУП обработки резанием на основе поддержания постоянства величины ТЭДС, измеренной при скорости резания V_T , найденной для одного значения S , не дает удовлетворительных по точности результатов, так как одной и той же величине ТЭДС при работе на различных S соответствуют различные T , отличающиеся между собой на 200–500% (или в 3–6 раз).

4. Скорости резания V_0 , оптимальные по интенсивности размерного износа и размерной стойкости УРИ, являются оптимальными и по шероховатости обработанной поверхности [4]. Зависимости $h_{он} = f(V)$ и $Rz = f(V)$, приведенные на рис. 3, построены на основании измерения Rz обработанной поверхности и размерного износа УРИ при проведении длительных стойкостных испытаний [4–6, 7–9]. Высота неровностей Rz принималась как среднее арифметическое величин Rz , полученных на обработанной поверхности в начале и конце периода нормального износа УРИ. Так как уровень скоростей резания V_T зависит от выбранного T , то естественно, что скорости резания, являющиеся оптимальными по Rz , в общем случае не будут совпадать с V_T .

5. При работе на V_0 обеспечивается минимум глубины и степени наклепа поверхностного слоя (см. рис. 3). Определение глубины наклепанного слоя h_c и микротвердости поверхности проводили методом косых срезов [3–6]. Заметим, что точки минимума на кривых $Rz = f(V)$, $h_c = f(V)$ и $H_D = f(V)$ были обнаружены в работах [3–6, 9–11].

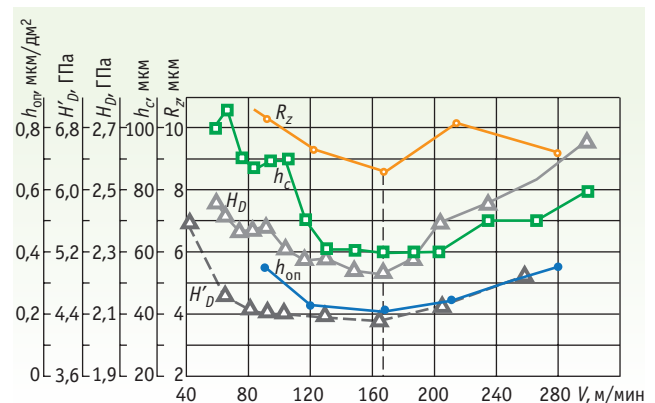


Рис. 3. Влияние скорости резания на параметры резания при точении стали 40ХНМА (унифицированный резец: РЭ составной, $\varnothing 5$ мм из т/с Т14К8; $t = 1$ мм; $S = 0,21$ мм/об)

Наличие взаимосвязи между интенсивностью размерного износа $h_{оп}$, с одной стороны, и Rz , глубиной и степенью наклепа (h_c и H_D) поверхностного слоя, с другой стороны, является закономерным, так как интенсивность износа и процесс образования поверхностного слоя определяются действием одних и тех же механо-физико-химических законов контактных взаимодействий [3–5, 8–11].

6. Оптимальная скорость резания V_0 и величина $h_{оп}$ не зависят от абсолютной величины износа $h_{оп}$ или h_3 , принимаемой в качестве критерия затупления, а скорость резания V_T и период стойкости T являются функцией величины износа по задней грани h_3 .

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Целью работы являлось разработка конструкций и типажей УРИ, первичной подсистемы многоуровневой базовой технологии (МБТ) и автоматизированное назначение РОР при групповой обработке деталей на автоматах продольного точения и станках с ЧПУ [12–15].

Влияние скорости резания на величину $h_{оп}$ УРИ (см. рис. 1) из Т14К8 при точении стали 13Х14Н3В2ФР (ЭИ736) при шести значениях величины h_r (h_r – абсолютный радиальный износ реза), принятой для расчета $h_{оп}$, показано на рис. 4а. Каждому значению h_3 соответствует одна и та же величина $V_0 = 85$ м/мин, причем абсолютные величины $h_{оп}$ при различных значениях h_r являются практически совпадающими. Вместе с тем каждому значению величины износа по задней грани h_3 соответствует свое значение скорости резания V_T (рис. 4б). Например, значения скорости V_T для периода стойкости $T = 80$ мин приведены в табл. 1.

Таблица 1. Скорость резания V_T , соответствующая величине износа по задней грани h_3 при $T = 80$ мин

h_3 , мм	0,25	0,25	0,30	0,35	0,40	0,45	0,50
V_T , м/мин	52	87	118	143	175	235	255

При изменении абсолютной величины h_3 , принимаемой обычно в качестве критерия затупления, всего лишь на 0,15 мм (с 0,25 до 0,40 мм), скорость резания V_T изменяется в два раза. На средней скорости $V_T = 130$ м/мин стойкость изменяется более чем в пять раз (с 21 мин при $h_3 = 0,2$ мм до 105 мин при $h_3 = 0,35$ мм). Таким образом, независимость V_0 и $h_{оп}$ от критерия износа позволяет резко сократить продолжительность опытов при исследовании обрабатываемости ТОМ и установлении режимов оптимального резания (РОР), так как отпадает необ-

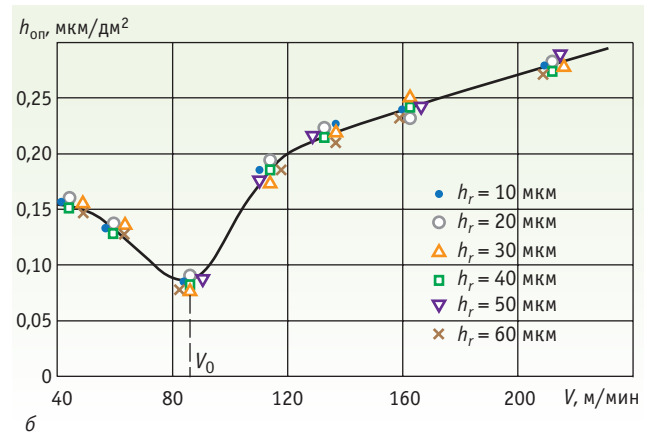
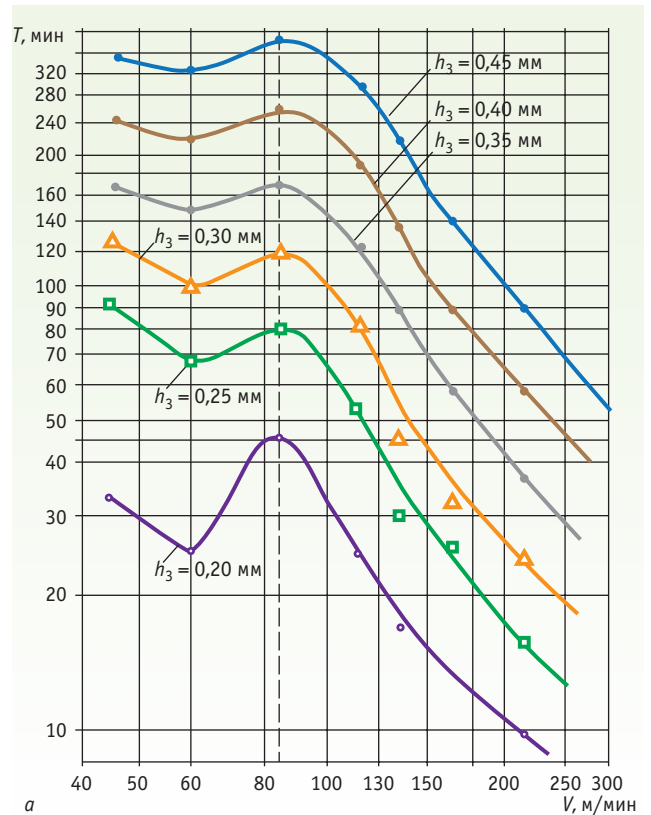


Рис. 4. Зависимости T и $h_{оп}$ от скорости резания для различных h_3 (а) и h_r (б) при точении стали 13Х14Н3В2ФР (ЭИ736); $t = 1$ мм; $S = 0,20$ мм/об (резец унифицированный наружный: державка 20×20 мм, составной РЭ $\varnothing 7$ мм, $R = 0,3$ мм, из т/с Т14К8)

ходимость стойкостных испытаний до полного износа УРИ [4, 15–18].

Чаще всего принимается, что количественной характеристикой обрабатываемости металлов при точении удобно считать скорость резания V_{60} , соответствующую 60-минутной стойкости РИ. Исследования показывают, что период стойкости $T \geq 60$ мин для некоторых ТОМ вообще невозмож-

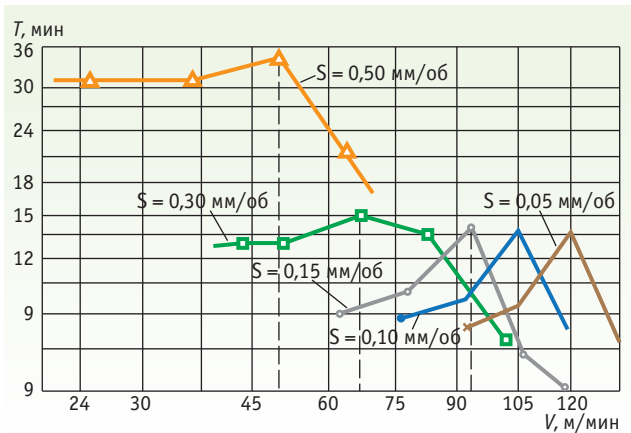


Рис. 5. Влияние скорости резания на T для резаца унифицированного наружного с РЭ из т/с ВК60М при точении жаропрочной стали 15Х18Н12С4ТЮ (ЭИ654); $t = 1$ мм

но получить при любом изменении режимов резания. Следовательно, в подобных случаях о скоростях резания V_{60} не может быть и речи, так как такие скорости просто не существуют. В качестве примера (рис. 5) приведена зависимость T от скорости резания при точении жаропрочной стали 15Х18Н12С4ТЮ (ЭИ654) резцом ВК60М с глубиной резания $t = 1$ мм. Для жаропрочных сплавов и высокопрочных сталей, например ХН60МВТЮ (ВК60М), ХН67ВМТЮЛ (ВК10ХОМ), 43ХН2МВФА (ВРК15), стойкость в этих парах ОМ–ИМ составляет 6...10 мин.

Хотя указанный твердый сплав (т/с) при обработке этой стали показывает лучшие по стойкости результаты по сравнению с другими (ВК6, Т15К6, Т5К10, Т30К4), стойкость УРИ из ВК60М при работе на подачах S 0,05–0,30 мм/об не превышает 12,5–15 мин, а при работе на $S = 0,5$ мм/об – 35 мин. Более высокие периоды стойкости при изменении режимов резания (РР) в достаточно широких пределах в данном случае получить не удалось, и, следовательно, скорости резания V_{60} не существует. Оптимальные же скорости V_0 существуют для каждого обрабатываемого материала [15–18]. Оптимальные скорости резания при точении стали 15Х18Н12С4ТЮ (ЭИ654) УРИ с РЭ из т/с ВК60М приведены в табл. 2.

Таблица 2. Оптимальные скорости резания при точении стали 15Х18Н12С4ТЮ (ЭИ654) УРИ с РЭ из т/с ВК60М

S , мм/об	0,05	0,1	0,15	0,30	0,50
V_0 , м/мин	120	105	95	67	51
T_0 , мин	13,5	14	14,5	15	35

Таблица 3. Результаты точения стали 12Х18Н10Т унифицированными резацами, РЭ составные $\varnothing 7$ мм из твердого сплава ВК6, ВК6М, ВК60М и Т14К8 при $t = 0,50$ мм; $S = 0,15$ мм/об; $h_3 = 0,40$ мм

T , мин	V_T , м/мин		$h_{оп}$, мкм/дм ²	
	ВК6/ВК6М/ВК60М	Т14К8	ВК6/ВК6М/ВК60М	Т14К8
40	115/128/148	205	0,41/0,37/0,32	0,24
49	106/117/140	$V_0 = 140$	0,34/0,31/0,27	0,21
55	100/110/122	100	0,30/0,27/0,25	0,30
70	92/99/109	57	0,27/0,25/0,23	0,68
90	83/91/99	34	0,24/0,22/0,20	0,87
145	$V_0 = 69/71/73$	–	0,18/0,17/0,16	–

Скорости резания V_T неудобны при сравнении режущих свойств различных ИМ, так как для разных марок твердых сплавов они могут соответствовать как левым, так и правым ветвям зависимости $h_{оп} = f(V)$, и по уровню скоростей резания V_T твердые сплавы могут располагаться в любой последовательности, определяемой выбранным периодом стойкости T (табл. 3).

Из данных табл. 3 следует, что, если сравнивать УРИ, оснащенные режущими элементами (РЭ) из т/с ВК60М и Т14К8 по скорости резания V_T при $T = 70$ мин, можно сделать вывод о преимуществе т/с ВК60М перед т/с Т14К8 – как по V_{70} , так и по величине $h_{оп}$. Сравнение тех же т/с по величине V_T и $h_{оп}$ при $T = 40$ мин указывает на преимущество т/с Т14К8, а при $T = 55$ мин эти т/с практически равноценны. Для т/с ВК60М скоростью резания $V_{70} = 92$ м/мин соответствует правой (ниспадающей) ветви кривой $h_{оп} = f(V)$, а для т/с Т14К8 скорость резания $V_{70} = 57$ м/мин лежит на левой (возрастающей) ветви кривой $h_{оп} = f(V)$. Соответственно, для т/с Т14К8 повышение V от $V_{70} = 57$ м/мин до $V_0 = 164$ м/мин приводит к снижению $h_{оп}$ и повышению размерной стойкости УРИ, а для ВК60М повышение V выше $V_{70} = 92$ м/мин приводит к монотонному и довольно резкому повышению величины $h_{оп}$ и снижению размерной стойкости.

Оптимальные величины резания для указанных РОР (табл. 3) для РЭ из т/с ВК60М составляют: $V_0 = 69$ м/мин; $T_0 = 49$ мин; $h_{оп} = 2,1$ мкм/дм².

Сравнение режущих свойств т/с ВК60М и Т14К8 при V_0 показывает, что эти т/с по величине $h_{оп}$ примерно равноценны и отличаются по уровню оптимальных скоростей резания и соответствующих им периодов стойкости.

Определенное влияние ИМ (марки т/с) на величину $h_{оп}$ при точении стали 12Х18Н10Т наблюдается почти для всех исследованных марок т/с (табл. 4).

Таблица 4. Влияние ИМ на величину $h_{оп0}$ при точении стали 12Х18Н10Т; режимы точения: $t = 0,1/0,5$ мм; $S = 0,05/0,30$ мм/об, $V = V_0$

Марка т/с	T30K4	T15K6	T14K8	T5K10	ВК2, ВК3	ВК4	ВК6	ВК6М	ВК60М, ВК10Х0М	ВПК15
$h_{оп0}$, мкм/дм ²	$\frac{0,283}{0,113}$	$\frac{0,37}{0,148}$	$\frac{0,24}{0,099}$	$\frac{0,288}{0,115}$	$\frac{0,333}{0,133}$	$\frac{0,30}{0,12}$	$\frac{0,25}{0,1}$	$\frac{0,20}{0,08}$	$\frac{0,1675}{0,067}$	$\frac{0,125}{0,05}$

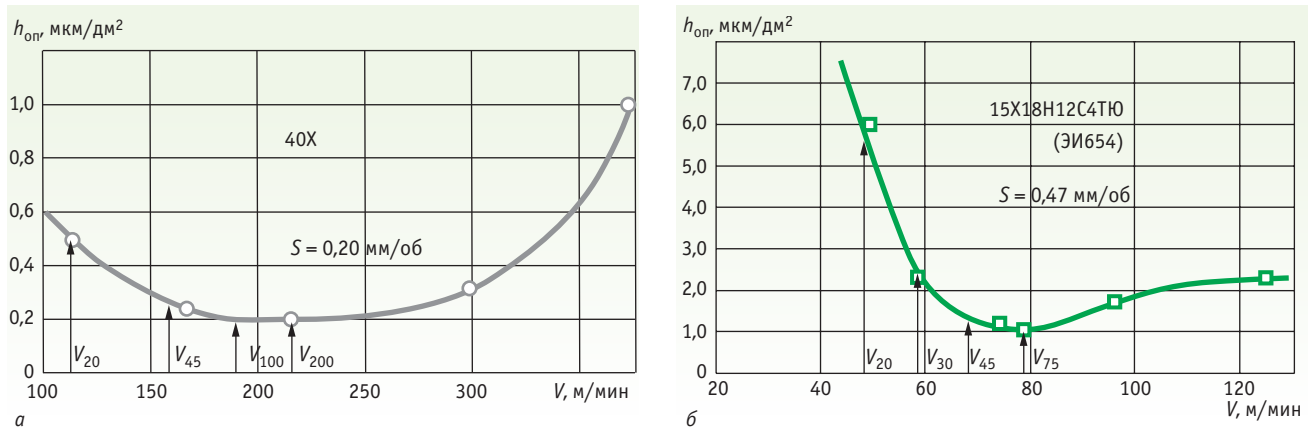


Рис. 6. Влияние скорости резания стали 40X (а) и 15Х18Н12С4ТЮ (б) на возможное повышение величины $h_{оп}$ при работе УРИ (20 × 20 мм, РЭ составной Ø7 мм) на скорости V_T по сравнению с работой на скорости V_0

В отличие от V_0 , скорость резания V_T не раскрывает резервов повышения размерной стойкости УРИ, а в ряде случаев использование V_T приводит к выбору нерациональных режимов резания, соответствующих левым (ниспадающим) ветвям кривых $h_{оп} = f(V)$. Это происходит в том случае, когда зависимость ($T - V$) устанавливается при работе на относительно высоких V , которым соответствуют периоды стойкости, значительно меньшие, чем T_0 , а скорость резания V_T находится путем экстраполяции зависимости ($T - V$) на заданный период стойкости T [14, 16, 20, 22–24]. Такие ошибочные рекомендации, к сожалению, приняты к действию в некоторых нормативах по РР.

В табл. 5 приведены данные о повышении технологической производительности обработки (ТПО) и размерной стойкости УРИ, которые достигаются при работе, на оптимальных скоростях резания V_0 по сравнению с нормативными V_T . Например, если точение стали 15Х18Н12С4ТЮ (ЭИ654) унифицированным резцом из т/с Т15К6 (при $t = 1$ мм, и $S = 0,47$ мм/об) вместо скорости $V_T = V_{20} = 48$ м/мин вести на оптимальной $V_0 = V_{20} = 78$ м/мин, то ТПО возрастает в 1,61 раза при одновременном повышении размерной стойкости резца в 6,55 раза (рис. 6).

При использовании скорости резания V_T остается неизвестным предел допустимого снижения скоростей резания, проводимого в целях повышения периода стойкости УРИ. Отсутствие данных о величине V_0 на практике затрудняет выбор РОР, соответствующих наиболее полному использованию

режущих свойств РИ. Использование скорости резания V_0 в качестве критерия обрабатываемости облегчает решение задачи установления РОР, являющейся важнейшей технико-экономической проблемой двигателя- и машиностроения, станко- и приборостроения в высокотехнологичных групповых производствах.

Для работы на автоматах продольного точения (TORNOS BECHLER ENC 164) спроектирован типаж унифицированных резцов левого исполнения (рис. 7, 8). Все резцы сборные с механическим креплением твердосплавных многократно перетачиваемых вставок – РЭ диаметром Ø1,5–7(9) мм [8, 9].

При использовании УРИ, показанных на рис. 2, 7 и 8 на высокоточных станках с ЧПУ типа Schaublin 102 (130) CNC или Tornos Bechler ENC 164 (264), были получены стойкостные зависимости для токарной групповой обработки заготовок из широко используемого жаропрочного сплава Inconel 718 (NiCr19Fe19NbMo DIN) и отечественного аналога ХН45МВТЮБР при одном допустимом износе по задней грани $h_3 = 0,31$ мм и соответствующем размерном износе, наиболее важном при точной финишной обработке (рис. 9). Размерная стойкость УРИ основана на показателях, приведенных в табл. 7 [4].

Из всех критериев размерной стойкости УРИ лишь $h_{оп}$ и $T_{ур}$ являются универсальными – они создают возможность объективно сопоставлять размерную стойкость всех типоразмеров УРИ при любых возможных сочетаниях V и S и износе их до разной степени затупления (рис. 9).

Таблица 5. Повышение производительности обработки и размерной стойкости УРИ при работе на оптимальных скоростях резания V_0 по сравнению с нормативными V_T . Унифицированный наружный резец, РЭ составной $\varnothing 7$ мм из т/с Т15К6; $t = 1$ мм; $R = 0,3$ мм

S , мм/об	T , мин	V_T , м/мин	V_0 , м/мин	V_0/V_T	$h_{опт}$, мкм/дм ² при V_T	$h_{опт}$, мкм/дм ² при V_0	$h_{опт} / h_{оп0}$
Обрабатываемый материал 40Х [5, 21]							
0,20	30	214		1,00	2,0		1,00
	60	189		1,13	2,1		1,05
	100	158	215	1,36	2,6	2,0	1,3
	150	128		1,70	4,0		2,0
	200	113		1,90	5,0		2,5
Обрабатываемый материал 15Х18Н12С4ТЮ (ЭИ654) [4, 15]							
0,12	120	58,5	130	2,22	148	72	2,06
0,17	120	53	114	2,15	128	51	2,50
0,23	120	49	102	2,08	109	45	2,42
0,33	120	44,5	87	1,95	102	32	3,18
0,47	20	78	77,5	1,0	9,15	9,15	1,0
"-"	30	67	"-"	1,16	15	"-"	1,61
"-"	40	60	"-"	1,29	21	"-"	2,29
"-"	60	52	"-"	1,49	44	"-"	4,8
"-"	75	48	"-"	1,61	60	"-"	6,55
"-"	90	45	"-"	1,72	-	-	-
"-"	120	40,5	"-"	1,91	-	-	-

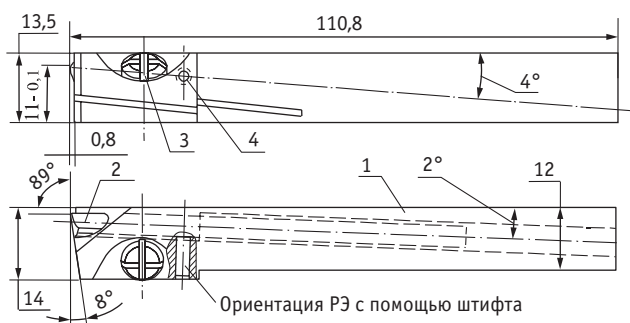


Рис. 7. Резец унифицированный наружный (РУН) подрезной 2107-00ЦТ-5МР/000; РЭ $\varnothing 5$ мм с радиусной канавкой

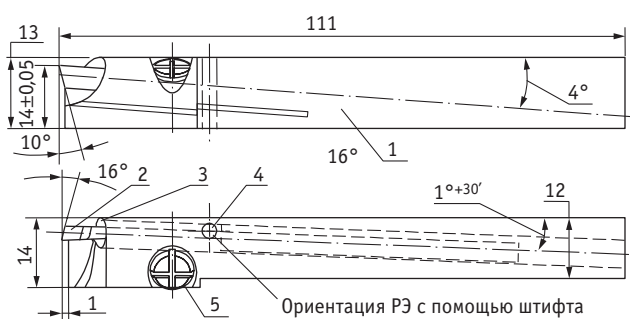


Рис. 8. Резец унифицированный канавочный и отрезной 2139-00I6МР/000; РЭ $\varnothing 5$ мм составной со стружколомом

На основании анализа табл. 7 [4] было принято решение об управлении процессом финишного точения посредством построения гаммы графиков стойкости типоразмеров УРИ в координатах Δr [мкм] – F (дм²), то есть зависимости размерного износа $\Delta r = f(F)$ от площади обработки поверхности заданного качества. На рис. 10 даны зависимости параметров качества обработанной поверхности и размерного износа основных типоразмеров унифицированных универсальных резцов (УУР) от их стойкости при РР, указанных в табл. 4 [9].

Для удобства пользования графиками на них нанесены границы зон различного качества поверхности, определяемого шероховатостью (R_a или R_z), погрешностью формы поперечного сечения (некруглостью), а также радиусом сопряжения поверхностей, который образуется методом врезания радиуса при вершине резца R . Каждая кривая (см. рис. 10 а и б) построена для конкретного типоразмера резца, который является базовым в своем диапазоне обрабатываемых размеров. Цифры в обозначении резца соответствуют минимальному диаметру обработки (при растачивании), буквы – типу резца, то есть определяют геометрию в плане. Например:

- 02Цв – контурно-врезной резец для внутренней обработки в интервале диаметров от 2 до 3 мм с обработкой последующего торца методом врезания (без радиальной подачи);
- 10Цт – контурно-подрезной резец для внутренней обработки в интервале диаметров от 10 до 18 мм с обработкой последующего торца методом подрезания (с радиальной подачей).

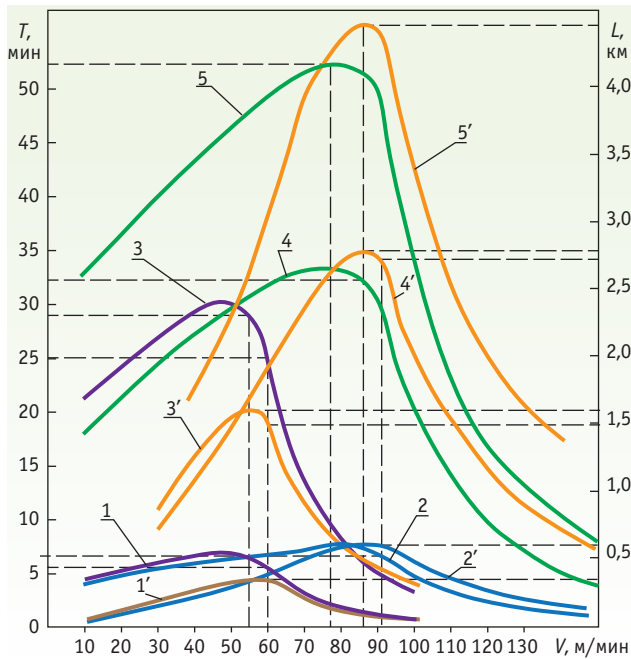


Рис. 9. Стойкость (T , мин; L , км) РИ с механическим креплением: СМП ромбической формы из т/с с покрытием методом высокоэнергетического импульсного магнетронного переноса (марки KCS10B – патент фирмы Kennametal) при непрерывном точении с СОЖ (1, 1'; 2, 2') сплава Inconel 718 [19], аналог РФ: ХН45МВТЮБР; РУН ($B \times H - 20 \times 20$, составной РЭ Ø7 мм из сплава ВРК15) – (3, 4, 5; 3', 4', 5'); 1, 2, 3, 4, 5 – $T = f(V)$; 1', 2', 3', 4', 5' – $L = f(V)$; 1, 3, 1', 3' – $S = 0,25$ мм/об, $t = 1,5$ мм; 2, 4, 2', 4' – $S = 0,15$ мм/об, $t = 0,25$ мм; 5, 5' – $S = 0,1$ мм/об, $t = 0,15$ мм; для всех опытов допустимый износ $[h_3] = 0,31$ мм

Резцы для наружной обработки имеют обозначение:

- 00Цс (для обработки сквозных цилиндрических поверхностей);
- 00Цв (для обработки глухих цилиндрических поверхностей с последующим коротким торцом методом врезания);
- 00Цт (для обработки глухих цилиндрических поверхностей методом подрезания с радиальной подачей).

Порядок работы с графиками (рис. 10а или б) следующий.

1. По выбранному из табл. 4 [9] РР устанавливают число проходов и их характер (предварительная обработка или финишная).
2. По характеру прохода и диаметральному размеру обрабатываемой поверхности (типоразмеру резца) выбирают кривую на рис. 10а или б.
3. Определяют два значения площади поверхности F , обработанной резцом до переточки, при

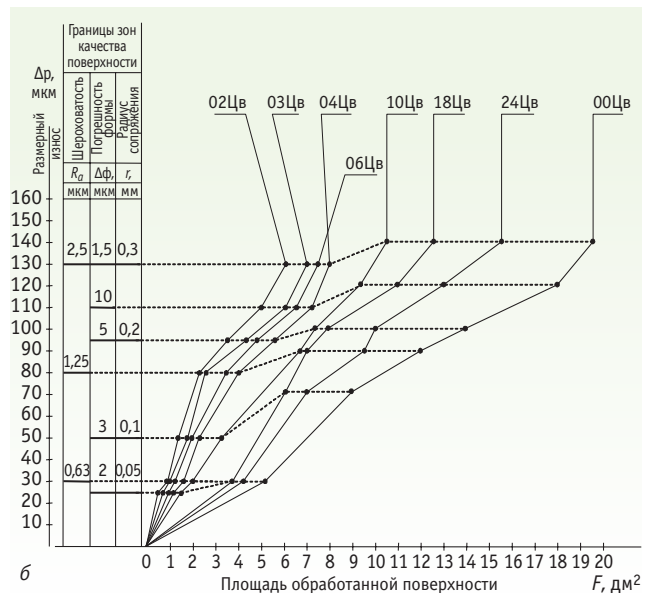
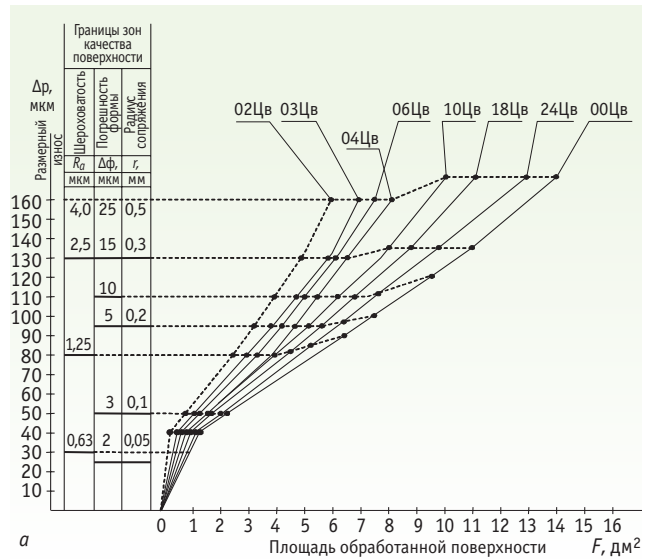


Рис. 10. Зависимости параметров качества ОП и размерного износа основных типоразмеров УУР от их стойкости: а – предварительные проходы; б – финишные проходы; пара материалов: 36НХТЮ (ХН77ТЮР) – ВК60М

4. Найденные значения F сравнивают по лимитирующему показателю (для которого эта F наименьшая), устанавливают окончательное значение достижимой F обработки, которая в каждом конкретном случае является ресурсостойкостью УРИ и критерием стабильности получения заданных размеров.
5. При отсутствии требований к $\Delta\phi$, а также для торцевых поверхностей возможную F устанавли-

Таблица 6. Таблица поправочных коэффициентов на изменение условий работы. ВК10ХОМ

Группы пар обрабатываемых материалов			Типоразмер (марка) режущей части инструмента							Отношение l/d основных типоразмеров резцов					Поправочные коэффициенты на изменение условия работы			Наличие охлаждения		Инструмент с доведенными рабочими поверхностями +ЭХО +СОТС						
I	II	III	ВК60М	ВК10М	ВК10ЧШБ	ВРК15	ВК6М	ВК8	КНТ16	Т30К4	2,5	3,0	3,5	2,0	2,5	3,0	2,0	2,5	Без доводки	С доводкой	Электрохимическое полирование (ЭХО)	Без СОТС	СОТС			
Коррозионностойкие стали и сплавы	Титановые сплавы	Магнитомягкие сплавы	I, II						III			02ЦВ 03ЦВ 04ЦВ			06ЦТ 10ЦТ		18ЦТ 24ЦТ									
Коэффициенты стойкости																										
$K_{мд}$			$K_{мр}$						$K_{l/d}$					$K_{бд}$	K_d	$K_{эхо}$	$K_{бс}$	$K_{СОТС}$	$K_{ЭХО+СОТС}$							
1,0–6,5	4,5–5,5	4,0–5,0	1,0	1,2	0,7	0,5	1,0	0,2	1,3	1,0	0,4	1,2	1,0	0,7	1,0	0,8	1,0	1,3	1,5	1,0	1,4	2,4				

ливают исходя только из требований к R_a или R_z и радиусу r сопряжения с соседней, например цилиндрической, поверхностью.

При использовании данных рис. 10 в случаях обработки других ОМ вводят поправочные коэффициенты [8, 9] на изменение условий работы, учитывающие типоразмеры (марки) ОМ и ИМ режущей части УРИ, отношение l/d , наличие и способ охлаждения, методы повышения износостойкости УРИ (табл. 6).

Технологические рекомендации по РОР разработаны в двух вариантах: в графическом виде и в таблично-матричной форме. За критерий оптимизации принят ресурс УРИ, выраженный величиной площади F (дм²) обработанной поверхности при обеспечении заданных чертежом ее шероховатости, допускаемой погрешности формы в поперечном сечении (допуска на размер) и при необходимости радиуса сопряжения поверхностей (например, при обработке шейки вала под подшипник). Такие исследования проведены впервые в мире!

В этих рекомендациях содержатся группы пар материалов, геометрические параметры УРИ, РОР, значения ресурса и размерной стойкости резцов, взаимосвязанные в единую систему (базу знаний), составляющую первичную подсистему многоуровневой базовой групповой технологии (МБГТ) [7–9].

Рассмотренный алгоритм является логической и методической основой подсистемы оптимизации

принятия комплексных технологических решений и в подсистеме синтеза инструментальных наладок в системе МБГТ [7–9, 13, 15]. Геометрические параметры режущей части УРИ оптимизированы с учетом групп пар материалов (ОМ и ИМ), типоразмера УРИ и типоразмера обрабатываемой поверхности. ОМ и ИМ объединены в три группы (табл. 6).

В области РР оптимизированы подача, глубина и скорость резания (частота вращения). При этом за базовые приняты РР ТОМ – дисперсионно-твердеющего сплава 36НХТЮ (HRC 28-32) резцами из т/с ВК60М, а при обработке деталей из других ОМ (любой группы) – скорость резания, F и размерный износ УРИ при выбранном РР определяют с помощью поправочных коэффициентов (табл. 6).

В основу разработки РОР положены РР элементарной поверхности, образуемой за один рабочий ход (проход). Процесс формирования конечных свойств поверхностей состоит из элементарных проходов, число которых зависит от требований, предъявляемых к исходной и окончательно обработанной поверхностям. Если исходная поверхность не удовлетворяет этим требованиям, число проходов увеличивают или ужесточают требования к заготовке.

При разработке рекомендуемых РР приняты определенные допущения [8].

Рассмотрим порядок выбора РОР с помощью таблиц матричной формы [8, 9].

Таблица 7. Таблица-матрица РР и стойкости УУР (фрагмент)

Обрабатываемые поверхности																									
Внутренние	Наружные	Цилиндрические	Торцевые	Диапазон диаметров, мм						Шероховатость R_a , мкм, (класс)			Погрешность формы поперечного сечения (некруглость), мм						Радиус сопряжения, мм						
				2-3	3-4	4-61	6-0	10-18	18-30	св-30	0,63 (8)	1,25 (7)	2,5 (6)	1,0	1,6	3	5	10	15	≤25	0,1	0,2	0,3		
				Тип резца						Площадь обработанной поверхности, dm^2 /Размерный износ, мкм															
				Цт	Цт	Цт	Цт	Цт	Цт	3	5	10	15	30	50	>50									
+	+						Цт Цт	5,2/50				3,2/30	5,2/50					5,2/50							
+	+						Тц Тц	2,8/50				1,7/30	2,3/50					2,8/50							
+	+						Цт Цт	19/135				9,8/70	14/100	19/135				9,8/70	14/100	19/135					
+	+						Тц Тц	10/135				5,0/70	7,3/100	10/135				5,0/70	7,3/100	10/135					
+	+						Цт Цт	11/135				5,7/70	8,0/100	11/135				5,7/70	8,0/100	11/135					
+	+						Тц Тц	5,5/135				2,9/70	4,1/100	5,5/135				2,9/70	4,1/100	5,5/135					
+	+						Цт Цт					8,0/70	11,5/100	16/135	25/130			8,0/70	11,5/100	16/135					
+	+						Тц Тц					4,0/70	8,2/100	8,5/135	14/130			4,0/70	6,2/100	8,5/135					
+	+						Цт Цт					1,0/70	1,8/110	2,1/135	3,5/160	1,0/70	1,6/100	2,1/135							
+	+						Тц Тц					2,2/70	3,8/110	4,3/135	5,9/160	2,2/70	3,2/100	4,3/135							
+	+						Цт Цт	8,0/135										4,1/70	5,8/100	8,0/135					
+	+						Тц Тц	15/135										7,8/70	11/100	15/135					
+	+						Цт Цт	4,4/135										2,2/70	3,2/100	4,4/135					
+	+						Тц Тц	8,5/135										4,3/70	6,0/100	8,5/135					
+	+						Цт Цт		9,0/160									2,6/70	4,0/100	5,5/135					

1. По марке ОМ выбирают: марку ИМ (табл. 6), геометрию режущей части резца (рис. 2), а также поправочный коэффициент на стойкость УРИ (см. табл. 6).
2. По типоразмеру обрабатываемой поверхности и требованиям к ней по R_a или R_z , $\Delta\Phi$ (некруглости, овальности) и g определяют числовые значения подачи, глубины и скорости резания (см. табл. 7, 8).
3. По выбранному режиму в соответствующей графе таблицы-матрицы 7, 8 находят ресурс резца, то есть площадь поверхности заданного качества, обработанной до переточки резца (или смены РЭ). В знаменателе дроби даны значения прогнозируемого ΔP как критерия стойкости УРИ. Графики для выбора оптимальных геометрических параметров УРИ и РР для пары 36НХТЮ (ХН77ТЮР) – ВК6ОМ (ОМ – ИМ) приведены на рис. 2 и 3 [9]. Оптимальные значения на графиках представляют собой точки перегиба кривых: им соответствует наивысшая стойкость УРИ, выраженная площадью F обработанной поверхности до регламентированного размерного износа УРИ.
 РОР оптимизированы на основе комплексного подхода к определению параметров РР с учетом

взаимовлияния всех элементов, входящих в технологическую систему, и связей между исходными, промежуточными и выходными параметрами РР [8, 9, 13]. Нормативы, представленные в таблично-матричной форме, используются для разработки алгоритмов и программ выбора типоразмера с последующим уточнением модели (конкретного исполнения) инструмента и РОР с применением ЭВМ [8, 9, 15, 21, 25].

ВЫВОДЫ И РЕКОМЕНДАЦИИ

1. При использовании скорости резания V_T остается неизвестным предел допустимого снижения V , проводимого в целях повышения Т УРИ. Отсутствие данных о величине V_0 на практике затрудняет выбор РОР и наиболее полное использование режущих свойств УРИ. Использование скорости V_0 в качестве критерия обрабатываемости решает задачу установления РОР – важнейшую научно-техническую и экономическую проблему машиностроения [4–6, 8, 9–16].
2. Работу на скорости V_M надо признать нерациональной – здесь наблюдаются низкая произво-

Таблица 8. Таблица-матрица РР и стойкости УУР (продолжение фрагмента)

Режимы																				Скорости резания, м/мин					
Переменные (программируемые) параметры																									
Подача, мм/об (толщина стружки • Кф)									Глубина резания или предельные разовые перемещения для врезных резцов (ширина стружки • Кф), мм																
									ΔS																
									Сумма разовых перемещений									$\Sigma \Delta S$							
0,01	0,02	0,03	0,04	0,05	0,06	0,07	0,10	0,05	0,10	0,20	0,30	0,40	0,50	0,75	1,0	1,5	2,0	3,0	10	20	30	40	60		
			+					+															+		
			+					+															+		
			+					+															+		
			+					+															+		
							+	+															+		
							+	+															+		
			+					+															+		
			+					+															+		
							+															+			
							+					+										+			
			+					+															+		
			+					+															+		
							+	+															+		
							+	+															+		
					+			+															+		

длительность и пониженная размерная стойкость L (высокая $h_{оп}$), себестоимость обработки и расход УРИ являются высокими.

- 3. При работе на скорости V_0 достигается наивысшая размерная стойкость УРИ, а его расход и погрешность обработки, связанные с износом РИ – минимальны (рис.1).
- 4. Работа на скорости V_3 вместо V_0 приводит к снижению себестоимости обработки и размерной стойкости УРИ, а его расход возрастает.
- 5. При экстремальном характере зависимостей $h_{оп} = f(V)$ максимум размерной стойкости наблюдается при V_0 . Поэтому в тех случаях, когда требуется выбрать или назначить РОР, обеспечивающий эту стойкость РИ (УРИ) и точность обработки, что особенно важно в условиях автоматизированного группового производства, то отсутствует свобода в выборе периода T стойкости РИ. В таких случаях вообще не следует выбирать какой-либо T , а после назначения t и S необходимо сразу принять оптимальную для сечения среза скорость резания V_0 . Размерная стойкость УРИ и путь резания L при этом будут максимальными! Стойкость T в этом случае может быть самая различная, зависящая от свойств ОМ и ИМ, типоразмера РИ (УРИ), допустимого размерного износа и других технологических факторов (см. рис. 4, 5, 6, 9 и 10).

- 6. Период стойкости T не является физической величиной, т. к. время работы УРИ вне РР процесса резания не может быть показателем работоспособности данной модели УРИ при обработке заготовки из данного ОМ в его конкретном физическом состоянии (НВ, прочность, состояние поставки и т. д.). Для каждой модели УРИ стойкостная зависимость $T-V$ оригинальна даже при одном и том же ОМ и одинаковых РР, поскольку отличаются жесткость обрабатываемой заготовки и активной части УРИ, а также условия теплоотвода из зоны резания, которые обуславливают оптимальную температуру резания [3–11].
- 7. Каким бы малым ни оказался период стойкости при работе на скорости V_0 , любая попытка повышения T путем снижения $V < V_0$ является недопустимым, так как неизбежно приведет к снижению размерной стойкости РИ, точности и качества обработки. Тем более недопустимым является завышение скорости резания $V > V_{мп}$ – это «убивает» РИ и повышает его расход в разы [3–6, 10, 11, 14].
- 8. Выбор и назначение РОР для типажей УРИ, специально спроектированных для групповой обработки ответственных деталей на различных станках, должно осуществляться по таблицам-матрицам первичной подсистемы МБГТ [7–9, 13, 15] или номограммам [4, 21], разрабо-

танним авторами с использованием теории проф. А. Д. Макарова и проверенным на практике приборостроительных, двигателестроительных, авиационных, агрегатных и оборонных предприятий.

ЛИТЕРАТУРА

- Звонцов И.Ф., Иванов К.М., Серебренников П.П.** Разработка управляющих программ для станков с ЧПУ: Учеб. пос. 2-е изд., стер. СПб: Лань, 2018. 588 с. (Учебники для вузов. Специальная литература).
- Кугультинов С.Д., Ковальчук А.К., Портнов И.И.** Технология обработки конструкционных материалов: учебник для вузов. Изд. 3-е, перераб. и доп. М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана. 2010. 678 с.
- Силин С.С.** Методы подбора при резании металлов. М.: Машиностроение, 1979. 152 с.
- Макаров А.Д.** Оптимизация процессов резания. М.: Машиностроение, 1976. 278 с.
- Макаров А.Д.** Износ и стойкость режущих инструментов. М.: Машиностроение, 1966. 264 с.
- Кишуров В.М., Криони Н.К., Постнов В.В., Черников П.П.** Резание материалов. Режущий инструмент: учеб. пособие / 3-е изд., перераб. и доп. М.: Машиностроение, 2009. 472 с.
- Ракунов Ю.П.** Оптимизация синтеза инструментальных наладок для станков с ЧПУ // Конструктор-машиностроитель. 2010. № 3, 5.
- Ракунов Ю.П.** Первичная подсистема многоуровневой базовой технологии // Научно-технические технологии в машиностроении. 2012. № 3. С. 23–31.
- Ракунов Ю.П.** Управление качеством токарной обработки высокоточных деталей машин // Научно-технические технологии в машиностроении. 2013. № 2. С. 36–48.
- Ермаков Ю.М.** Выбор оптимальной скорости резания на основе стойкостной зависимости для режущего инструмента. М.: ВНИИТЭМР, 1986. 64 с.
- Воронцов А.Л., Албагачиев А.Ю., Султан-Заде Н.М.** Теоретические основы обработки металлов в машиностроении: монография. Старый Оскол: ТНТ, 2020. 552 с.
- Митрофанов С.П., Братухин А.Г., Сироткин О.С. и др.** Технология и организация группового машиностроительного производства: в 2-х ч. Ч. 1. Основы технологической подготовки группового производства. М.: Машиностроение, 1992. 480 с.
- Ракунов Ю.П., Абрамов В.В.** Разработка САПР оптимальных групповых процессов токарной обработки на станках с ЧПУ // Справочник, Инженерный журнал, приложение. 2015. № 7. С. 1–29.
- Справочник технолога / Под ред. А.Г. Суслова. М.: Машиностроение, 2019. 678 с.
- Ракунов Ю.П., Абрамов В.В., Ракунов А.Ю.** Роль скорости резания и радиуса округления режущего клина в эффективности тонкой механической обработки труднообрабатываемых материалов // СТАНКОИНСТРУМЕНТ. 2020. № 1, 2. С. 66–72.
- Копылов Ю.Р.** Компьютерные технологии в машиностроении (практикум+CD): учеб. пос. Воронеж: Изд.-полиграф. центр «Научная книга», 2012. 508 с.
- Старков В.К.** Физика и оптимизация резания металлов. М.: Машиностроение, 2009. 409 с.
- Ермаков Ю.М.** Комплексные способы эффективной обработки резанием: Библиотека технолога. М.: Машиностроение, 2003. 272 с.
- Кеннаметал представляет токарный сплав KCS10B для обработки жаропрочных сплавов. Журнал «Твердый сплав». <http://tverdysplav.ru> (дата обращения 12.10.2020).
- Грубый С.В.** Оптимизация процесса механической обработки и управление режимными параметрами. М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2014. 149 с.
- Ракунов Ю.П., Абрамов В.В., Ракунов А.Ю.** Номограммы выбора подач и скоростей резания исходя из требуемой шероховатости обработки и износа унифицированных резцов. Междунар. науч. журнал «Школа Науки», № 11(22), Сентябрь, 2019. С. 7–12.
- Machining: fundamentals and recent advances / Ed. J. Paulo Davim. Springer, 2008. 361 p.
- Klocke F.** Manufacturing Processes. Cutting. Springer, 2011. 500 p.
- Sandvik Coromant. Рекомендации по режимам резания. Токарная обработка. <http://www.coroguide.com/CuttingDataModule/CDMTurning.asp>. (дата обращения 24.12.2018).
- Hot topics // CAD/CAM/CAE Observer. [Электронный ресурс] – режим доступа: <http://www/cadcamcae.lv/hot.html>.

РАКУНОВ Юрий Павлович – кандидат технических наук, доцент Национального исследовательского Московского государственного строительного университета

АБРАМОВ Валерий Васильевич – доктор технических наук, профессор Национального исследовательского Московского государственного строительного университета

РАКУНОВ Александр Юрьевич – инженер Национального исследовательского Московского государственного строительного университета

