

УДК 621.9.025

**Ю. П. Ракунов**, канд. техн. наук, доц., **В. В. Абрамов**, д-р техн. наук, проф.,  
**А. Ю. Ракунов**, инженер

НИУ Московский государственный строительный университет, Россия

Телефон: +7 (916) 8107126; E-mail: [Rakunov1991@mail.ru](mailto:Rakunov1991@mail.ru);

## ЗАКОНОМЕРНЫЕ СООТНОШЕНИЯ ЗНАКОВЫХ СКОРОСТЕЙ РЕЗАНИЯ ТОКАРНОЙ ГРУППОВОЙ ОБРАБОТКИ

*В статье рассмотрены научно-технические подходы к проблеме определения скорости резания при механической групповой обработке внутренних и наружных поверхностей деталей машин и приборов. Произведено сравнение двух основных моделей расчета и определения экономической скорости резания и стойкости инструмента при известных технологических условиях обработки на токарных универсальных и станках с ЧПУ. Разобраны методы оптимизации режимов резания и стойкости инструмента, основанного на теории А. Д. Макарова. Разобраны методические ошибки некоторых исследователей по произвольному назначению «экономической» скорости и стойкости инструмента, основанного на формулах Ф. Тейлора и на экономическом подходе к их расчёту. Показано, что использование закона постоянства оптимальной температуры резания обеспечивает максимальную стойкость инструмента, наивысшую точность обработки при оптимальной скорости резания для конструкционных сталей, сплавов и труднообрабатываемых материалов.*

**Ключевые слова:** условия резания, экономическая скорость резания, оптимальная температура резания, интенсивность износа, максимальная и экономическая стойкость инструмента, адаптивное управление.

**Yu. P. Rakunov, V.V. Abramov, A.Yu. Rakunov**

## REGULARITIES RELATIONSHIPS OF SIGNIFICANT CUTTING SPEEDS OF TURNING GROUP PROCESSING.

*The article considers the scientific and technical approaches to the problem of determining the cutting speed during mechanical group processing of the internal and external surfaces of machine parts and devices. A comparison is made of two basic models for calculating and determining the economic speed of cutting resistance under known technological processing conditions on universal turning and CNC machines. Methods of optimization of cutting conditions and tool life based on the theory of A. D. Makarov are analyzed. The methodological errors of some researchers on the arbitrary purpose of the "economic" speed and durability of an instrument based on F. Taylor's formulas and on the economic approach to their calculation are analyzed. It is shown that the use of the law of constancy of the optimum cutting temperature ensures the maximum durability of any tool, the highest machining accuracy at the optimal cutting speed for structural steels, alloys and hard-to-process materials, including high-strength steels, heat-resistant and titanium alloys.*

**Keywords:** cutting conditions, economic cutting speed, optimum cutting temperature, wear rate, maximum and economic tool life, adaptive control.

### 1. Введение

Резание – комплексное явление, соединяющее в себе способ резания, объект воздействия (заготовку), станок и режущий инструмент (РИ). Основная доля затрат на обработку резанием обратно пропорциональна размерной стойкости РИ. Известно, что большинство факторов, влияющих на интенсивность износа РИ: отношение контактных твёрдостей, диффузия и адгезия, окислительные процессы, пластическое течение поверхностных слоёв инструмента, изменение свойств обрабатываемого металла в контактных зонах и др., является функцией коэффициентов трения и температуры контактных поверхностей режущего клина в зоне стружкообразования [1-5].

Наиболее резкое изменение физических свойств обрабатываемых металлов и сплавов происходит при критических температурах структурно-фазовых превращений. При этих температурах наблюдается резкое уменьшение коэффициента диффузии хро-

ма, кобальта и вольфрама в железо и сталь [2-4]. Сопоставление значений  $\theta_0$  с температурами точек АС<sub>3</sub> для разных легированных сталей, высокопрочных и жаропрочных сплавов показало вполне удовлетворительное их совпадение.

Факт существования для каждой пары материалов: обрабатываемый (ОМ) – инструментальный (ИМ) оптимальной температуры  $\theta_0$  резания и её независимость от элементов режимов резания (РР), геометрии РИ, в том числе унифицированного (УРИ) с режущими элементами (РЭ) из различных ИМ, даёт ряд следующих преимуществ в условиях автоматизированного группового производства [5-7].

Работа на **оптимальной скорости резания  $V_O$**  обеспечивает:

- наименьшую интенсивность износа РИ (УРИ) и наибольшую его размерную стойкость, что приводит к достижению наивысшей точности обработки и повышению надёжности обеспечения заданного качества обработки;
- минимум шероховатости обработанной поверхности, количества дислокаций и других физико-механических показателей. Это объясняется тем, что при  $\theta_0$  у сталей, жаропрочных и титановых сплавов возникает эффект «провала пластичности» [2-4, 8];
- повышенные эксплуатационные свойства деталей: длительную и усталостную прочность, коррозионную стойкость, износостойкость, жаропрочность, контактную жёсткость по сравнению с поверхностями, обработанными на  $V$ , отличных от  $V_O$ ;
- использование рекомендаций по режимам оптимального резания (РОР) металлов существенно повышает производительность групповой обработки различных деталей.

Оптимальные по минимуму интенсивности относительного поверхностного износа  $h_{оп}$  РИ являются РОР по усилиям и мощности резания, по форме и характеру схода стружки, обеспечивают максимальный период стойкости РИ –  $T_O$ , мин. [2, 4].

## 2. Основное содержание и результаты работы

Использование оптимальной скорости резания  $V_O$  исключает случаи технической неграмотной эксплуатации РИ, когда в погоне за высокой  $T$ , мин, на производстве в ряде случаев используют явно заниженные скорости резания  $V_T$  (табл. 1) [1-3].

Таблица 1. – Эффективность оптимального резания (повышение размерной стойкости УРИ, технологической производительности и снижение себестоимости обработки при работе на  $V_O$  по сравнению с нормативными скоростями  $V_T$ , соответствующими стойкости  $T$ )

Пара материалов		Период стойкости $T_O$ , мин, соответствующий $V_O$	Вид обработки	$t$ , мм	$S$ , мм/об	$V_O$ , м/мин	$\frac{l_O}{l_T}$	$\frac{V_O}{V_T}$	$\frac{A_T}{A_O}$
Детали; заготовки	Резца; РЭ УРИ								
Э 20		<b>240</b>	Растачивание, точение	0,50	0,21	<b>490</b>	1,71	1,74	1,76
		<b>120</b>				<b>380</b>	1,22	1,17	1,19
45	Т15К6	<b>230</b>	Точение	1,0	0,20	<b>280</b>	2,33	1,73	1,82
40Х		<b>200</b>	наружное		0,20	<b>215</b>	2,55	1,90	1,99
40ХНМА		<b>240</b>	получистовое		0,30	<b>153</b>	1,32	1,24	1,26
4Х12Н8Т8МФБ		<b>90</b>			0,21	<b>115</b>	2,28	2,13	2,24

11X11H2B2MФ .15X18H12C4TЮ	ВК6М	<b>100</b> <b>75</b>	Точение наружное	2,0 1,0	0,43 0,47	<b>108</b> <b>78</b>	2,5 3,34	2,58 1,61	2,56 2,54
12X18H10T	ВК8	<b>30</b>	Нарезание резьбы	0,2/0,1	1,5	<b>70</b>	2,0	1,55	1,85
40X	P18	<b>240</b>	Зубофрезеро- вание	$m = 2$	2,5	<b>27</b>	1,15	1,60	1,46

К сожалению, в погоне за производительностью часто жертвуют стойкостью РИ, назначая завышенную  $V_T$ , соответствующую по устаревшей формуле Ф. Тейлора, выбранному периоду стойкости  $T$ , мин [8-10]. При этом повышение  $V_T$  на 50...55% приводит к резкому снижению  $T$  в 4...5 раз, что недопустимо, как по причине низкого качества обработки, так и высокой инструментоёмкости процесса, частоты смены и наладки РИ, что нарушает работу станков с ЧПУ в режиме «настройки и коррекции размеров» обрабатываемых поверхностей при автоматическом управлении процессом индивидуальной и групповой оптимизации обработки прецизионных деталей [6-14].

Работа на скорости резания  $V_T < V_0$  при достаточно высокой стойкости  $T$  экономически невыгодна не только из-за низкой производительности и высокой стоимости обработки, но и повышенного расхода РИ и УРИ [2-5,7,11-13].

Обработка современных высокотоксичных и пиррофорных сплавов на  $V_0$  является наиболее предпочтительной по условиям техники безопасности процесса и качества групповой обработки на станках с ЧПУ и обрабатывающих центрах (ОЦ) [2-4].

Использованное  $V_0$  даёт объективную сравнительную оценку обрабатываемости резанием конструкционных ОМ и режущих свойств ИМ [2,4,5-8]. Оценка режущих свойств по скорости резания  $V_T$ , соответствующей  $T$  (мин), обычно приводит к противоречивым результатам (см. табл. 2).

Таблица 2. Сравнение режущих свойств унифицированных твердосплавных резцов с РЭ из ВК6, ВК6М, ВК6ОМ и Т14К8 при чистовом точении ( $t = 0,5$  мм,  $S = 0,15$  мм/об) стали 12X18H9T по уровню скоростей резания  $V_T$  при разных выбранных значениях  $T$

$T$ , мин	$V_T$ , м/мин		Отношение	$\frac{V_{V_T(ВК6/ВК6М/ВК6ОМ)}}{V_{V_T(Т14К8)}}$
	ВК6/ВК6М/ВК6ОМ	Т14К8		
40	115 / 128 / 148	205		0,56 / 0,62 / 0,72
49	106 / 117 / 130	$V_0=130$		0,80 / 0,88 / 1,00
55	100 / 110 / 122	100		1,00 / 1,10 / 1,22
70	92 / 99 / 109	57		1,61 / 1,74 / 1,91
90	83 / 91 / 99	34		2,44 / 3,05 / 3,82
$T_0 = 145$	$V_0 = 69 / 71 / 73$	—		—

Взаимовлияние  $V$  и  $T$ , к сожалению до сих пор, принято в литературе выражать формулами Ф. Тейлора степенного вида (аппроксимация ниспадающей гиперболой):

$$V = C / T^m$$

Такие формулы справедливы лишь для узкого диапазона  $V$ , при этом  $m \neq const$ . При изменении  $V$  в широком диапазоне для различных процессов и материалов обра-

ботки резанием РИ из быстрорежущих порошковых сталей и твердых сплавов зависимость длины пути резания  $L$  и объема стружки  $Q$  от скорости  $\{L = V \cdot T = f(V)\}$  носит экстремальный характер и нередко с двумя экстремумами (см. рис. 1) [2-8].

Положение точек максимума на кривых  $L = f(V)$  зависит от физико-механических свойств материалов заготовки и инструмента, сечения среза и других условий резания (охлаждения). При повышении режущих свойств инструментальных материалов (ИМ) наблюдается повышение скоростей  $V_0$ , соответствующих максимуму  $L$  или минимуму интенсивности относительного поверхностного износа  $h_{оп}$  РИ.

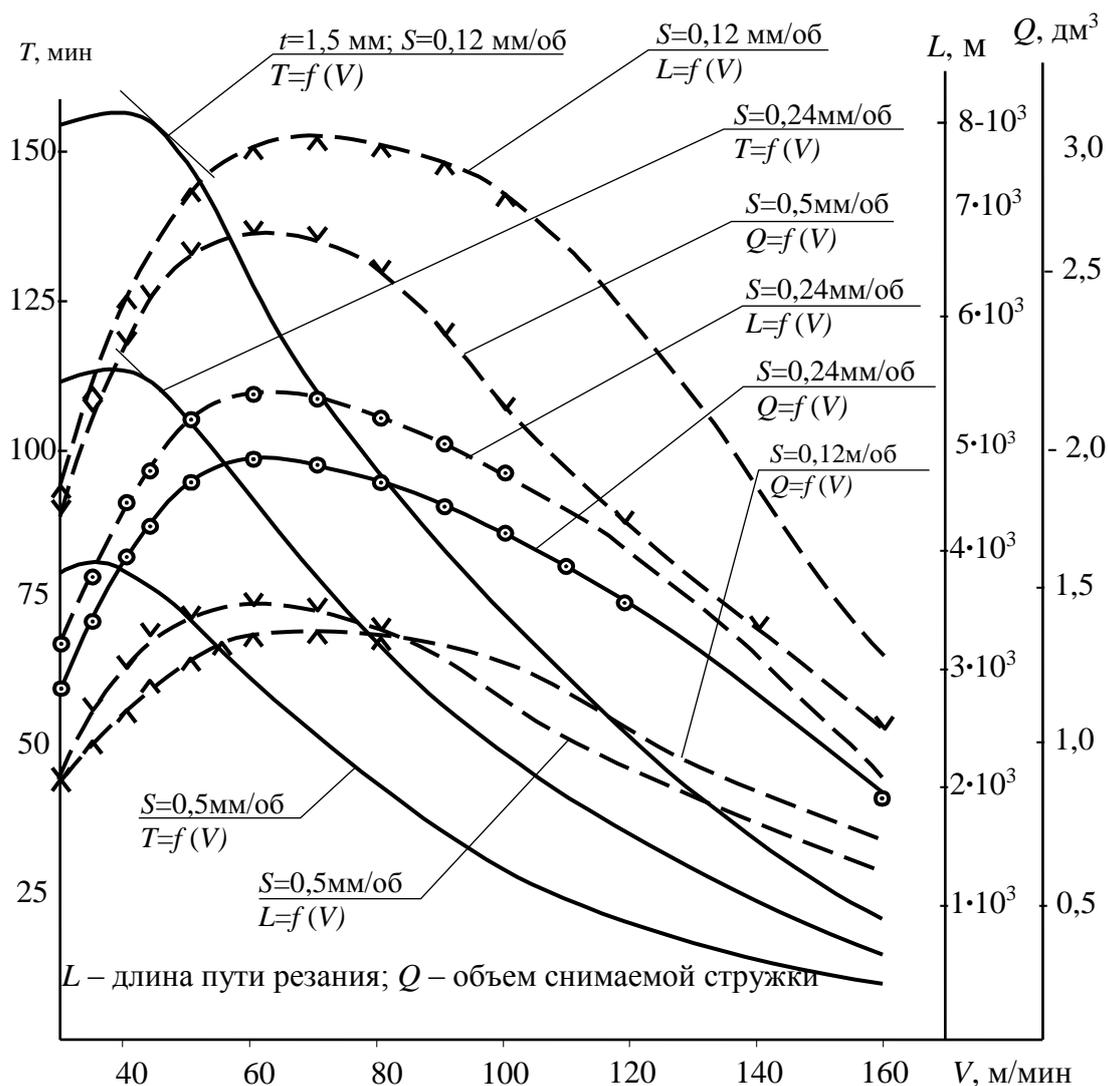


Рисунок 1. Параметры лучистой токарной обработки – продольное точение при  $t=1,5$  мм;  $S=0,12...0,5$  мм/об заготовки диаметром в диапазоне 30 - 100 мм из стали 60 резами с механическим креплением СМП из твердого сплава КНТ16 на станке с ЧПУ ТПК-125В.

Оптимальная  $V_0$  при обработке различных материалов колеблется в пределах от 10...30 м/мин для закаленных сталей и жаропрочных сплавов РИ из твердых сплавов до 300...450 м/мин при обработке заготовок из углеродистых сталей резами из минера-

локерамики. При экстремальности зависимостей размерной стойкости РИ от  $V$  зависимость  $T = f(V)$  может быть и экстремальной и монотонно убывающей [2]. Максимумы размерной стойкости РИ и общей  $L$  наблюдаются при различных  $V$  и  $S$ , а, следовательно, и температурах в зоне резания (рис. 1).

Для определения  $V_0$ , соответствующей максимуму  $L$ , надо первую производную пути  $L$  от  $V$  приравнять нулю:

$$L = V \cdot T;$$

$$(L)_{V'} = T + (T)_{V'} V = 0, \text{ откуда:}$$

$$V = V_0 = -T / (T)_{V'}. \quad (1)$$

Так как  $V_0$  и  $T$  являются положительными величинами, то равенство (1) может наблюдаться лишь при отрицательном значении величины  $(T)_{V'}$ , что возможно только для ниспадающей кривой. Следовательно,  $V_0$  соответствует правой (ниспадающей) ветви кривой  $T = f(V)$ . Поэтому всегда справедливо неравенство:  $V_M < V_0 < V_Э$ , где  $V_M$  - скорость резания, соответствующая максимуму  $T_M$ .

Даже в тех случаях, когда период стойкости  $T_M$ , наблюдаемый при  $V_M$  выше  $T_0$ , наблюдаемого при  $V_0$ , работа на скорости  $V_M$  является нерациональной, так как это приводит к снижению размерной стойкости  $L$ , производительности  $\Pi$  и ухудшению качества обработанной поверхности (см. рис. 2 и 3).

Оптимальные  $V_0$  достоверно могут быть выявлены на основе обычных стойкостных испытаний по кривым  $T = f(V)$ , при исследовании интенсивности размерного износа по кривым  $h_{ол} = f(V)$  и  $h_{оп} = f(V)$ , например, микрометрическим методом, позволяющим определить абсолютные величины относительного износа, которые необходимо знать при проектировании, наладке оборудования и расчете точности групповых технологических процессов, реализующихся на станках с ЧПУ и автоматических линиях [2-10, 14-18].

Оптимальная температура  $\theta_0$  (или термо-ЭДС) и поддержание её на постоянном уровне позволяет надёжно производить адаптивное управление процессом резания и автоматически поддерживать его на оптимальном уровне. Управление процессом резания при обработке деталей сложной формы (дисков турбин и компрессоров, гироскопов и др.) было успешно реализовано при групповой обработке деталей на двигателестроительных и приборостроительных заводах с большим экономическим эффектом [2-5].

Принципиальной методической ошибкой некоторых авторов является попытка назначения стойкости РИ как «нормативную» – путем произвольного выбора, например, из ряда: 15, 20, 30, 45, 60 или 90 минут [1, 8, 12]. Такой выбор противоречит многочисленным экспериментальным данным [2-7, 13, 14] (**практика – критерий истины**), а также сформулированной на основании исследований по теории проф. Макарова А.Д., который открыл и доказал закон оптимальной температуры  $\theta_0$  резания для различных методов обработки резанием конструкционных и труднообрабатываемых материалов [2, 4, 5-7].

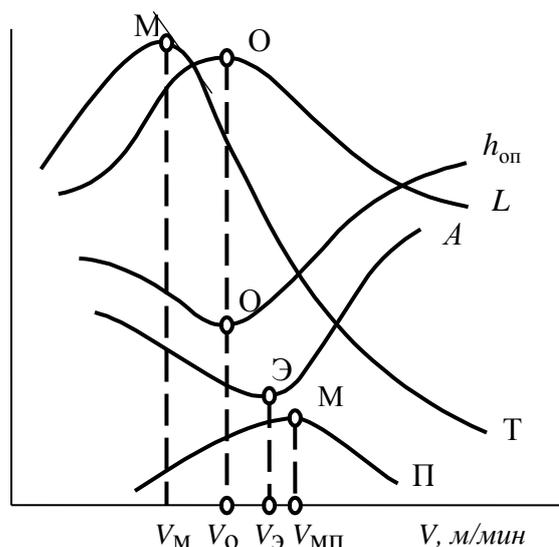


Рисунок 2. Схема влияния скорости резания на период стойкости  $T$ , путь резания  $L$ , интенсивность износа РИ  $h_{оп}$ , себестоимость  $A$  и технологическую производительность обработки  $\Pi$  (по Макарову А.Д.).

В действительности, оптимальная стойкость резания  $V_0$  определяется закономерностями механо-физико-химического контактного взаимодействия (ОМ) и (ИМ) материалов (см. табл.1), т.е. интенсивностью изнашивания в этой трибологической паре и допустимого **размерного износа**, который обычно регламентируется по старой привычке допустимым износом по задней грани  $[h_3]$ , который затруднительно определять, особенно в процессе контурной обработки на станках с ЧПУ [2-5, 14, 19-21].

Тем более ошибочным методом является общепринятый способ определения «экономической» стойкости  $T_Э$  [1, 3, 8, 12, 23] при наибольшей производительности станка на данном переходе (одним РИ) по формуле:

$$T_Э = (1/m - 1) t_{см}, \text{ мин.}, \tag{2}$$

где  $t_{см}$  – время на замену РИ после затупления и настройку станка [1-4, 8], т. е. как будто бы механо-физико-химические процессы в паре (ОМ-ИМ) напрямую зависят от конструкции РИ, его резцедержателя, точности прибора настройки РИ вне станка и квалификации наладчика станка с ЧПУ [9-15]. Кроме этого, следует учитывать, что время  $t_{см}$  в настоящее время на современных многоцелевых станках доводится до минимума (до 4...16 с «от реза до реза») при использовании автоматических механизмов смены РИ.  $T_Э$  в этом случае «экономическая» стойкость:

$$T_Э = (1/0,2 - 1) (4...16) = 16...64 \text{ с.}$$

Для универсальных токарных станков и станков с ЧПУ с ручной сменой РИ можно принять время  $t_{см} = 1...3$  мин (для поворота СМП или замены подготовленного вне станка УРИ):  $T_Э = (1/0,2 - 1) (1...3) = 4...12$  мин, что на порядок ниже, чем реальная стойкость РИ при обработке конструкционных сталей и тем более цветных сплавов. И только, если принять, что время смены изношенного РИ (паяного) включает в себя время на его ручную переточку или подточку  $t_{см}$  может составлять 10...15 мин. В этом случае:

$$T_{\Sigma} = (1/0,2 - 1) (10...15) = 40...60 \text{ мин.}$$

Проведенный анализ и расчёт показывает во сколько раз (на несколько порядков) отличается на практике  $T_{\Sigma}$ , определяемый в различных условиях эксплуатации универсальных, станков с ЧПУ и многоцелевых, а также фрезерно-расточных обрабатывающих центров. Использование формулы (1) категорически недопустимо для реальных условий токарной и других видов механической обработки.

Определение «экономическая стойкость» – стойкость, которая для заданных условий обработки обеспечивает наибольшую производительность и минимальную стоимость обработки [1] на переходе (при обработке одним РИ):

$$T_{\Sigma} = (1/m - 1) [t_{\text{см}} + (Q_{\text{T}} + Q_{\text{И}}) / E], \text{ мин,} \quad (3)$$

где:  $Q_{\text{T}}$  – затраты, связанные с работой РИ в течение одного периода стойкости;  $Q_{\text{И}}$  – затраты на переточку РИ;  $E$  – стоимость станкоминуты, руб.

Данная **формула также не выдерживает критики** в силу принципиальной независимости физической размерной стойкости РИ (УРИ) от времени  $t_{\text{см}}$ , а также непостоянства величины  $m$  ( $m = \text{var} = 0,15...0,42$ ) и противоречивости вклада «стоимости периода стойкости» в сам период стойкости РИ и УРИ. Таким образом нарушается причинно-следственная связь явлений, что недопустимо в науке, а тем более на практике.

Получается полная неопределенность с достоверным определением  $T_{\Sigma}$  и соответствующей ей  $V_{\Sigma}$  [1]. Таким образом,  $T_{\Sigma}$  не может быть рассчитана экономическим (бухгалтерским) методом.

На этой же странице указано, что «на станках с ЧПУ с автоматической сменой инструмента «экономическая» стойкость  $T_{\Sigma}$  может быть принята равной 15-20 мин, т. е. значительно меньшей, чем на станках с ручным управлением (когда  $T_{\Sigma}$  принимается в диапазоне 60...90 мин). Это позволяет форсировать режимы, т. е. скорость резания и получить на станках с ЧПУ большую производительность обработки», (качество при этом не гарантируется), причём за счет удорожания стоимости эксплуатации РИ, что выгодно только производителям и поставщикам (посредникам) дорогостоящего инструмента, например, иностранным фирмам, поставляющим неперетачиваемые пластины [12,19-22] для РИ с механическим креплением. Потребителю же это невыгодно, т. к. не только удорожает продукцию, но и выводит станки из строя по причине их недопустимого износа или уменьшения межремонтного цикла, что удорожает стоимость и без того дорогой станкоминуты станка с ЧПУ или обрабатывающего центра [1, 6, 8, 12].

При использовании импортных резцов с СМП (да и отечественных – тоже) на предприятиях ВПК (в частности, двигателестроительный НПЦ газотурбостроения «Салют», заводах ОКБ «Сухого», заводе им. Хруничева) в технологии механической обработки ответственных деталей летательных и космических аппаратов (ЛиКА) появилась запись **«режущую пластину сменить после одного прохода»** по обрабатываемой поверхности или **«принудительно сменить СМП после нескольких? минут работы»**, т. е. технологам приходится перестраховываться применяя РИ с СМП. Это положение возникает по причине отсутствия достоверной информации, которая должна предоставляться ведущими фирмами-производителями резцов с СМП, о характере износа и стойкости этих пластин при обработке различных конструкционных, жаропрочных, титановых и, особенно труднообрабатываемых, летающих материалов. Такое недопусти-

мое положение заставляет предприятия-потребители самим заниматься испытаниями тех СМП, которые во множестве распространены на рынке от различных производителей (вплоть до чешских, итальянских и китайских), не говоря уже о SANDVIK Coromant, ISCAR, KORLOY, MITSUBISHI, KENNAMETALL и многих других. Нежелание предоставлять результаты стойкостных испытаний СМП этих фирм легко объяснить – это им не выгодно. В тоже время, эти фирмы охотно предлагают предприятиям-потребителям самим испытать вновь разрабатываемые СМП на наших заводах в реальных производственных условиях, при условии предоставления результатов испытаний фирмам-производителям СМП. Таким образом за них делается ответственная работа и собирается статистический материал. На ведущих фирмах-поставщиках СМП для этого из сверхприбыли предусмотрены так называемые «представительские расходы», которые продвигают их продукцию на рынок. РФ в этом смысле свой рынок уже потеряла, или близка к такому состоянию. Т. о. наша страна попадает в техническую и технологическую зависимость от стран Запада [19-23].

Для сохранения независимости и отстаивания национальных интересов РФ необходимо развивать своё производство, не копирующее их «достижения», а реализующее отечественные разработки, в частности, унифицированный РИ и таблицы-матрицы режимов оптимального резания (РОР), разработанные в наукоёмкой первичной подсистеме многоуровневой базовой технологии, позволяющей эффективно реализовывать методы высокотехнологичной групповой технологии, повышая при этом стойкость УРИ в несколько раз (в 5-10 раз), гибкость производства, поднять его производительность и эффективность минимум в 2 раза. При этом будут загружены отечественные инструментальные заводы, созданы дополнительные рабочие места, повышена производительность труда на этих заводах при небольших капиталовложениях и внутренних инвестициях. Только таким образом можно осуществить *импортозамещение* и прорыв в ХХI век по качеству и производительности нашей оборонной и гражданской промышленности [5-7, 11, 13, 15].

По данным [2-5, 8, 13] «экономическая» стойкость  $T_{\Sigma}$  для различных РИ и пар материалов (ОМ-ИМ) может быть принята равной 30-360 мин (см. табл. 1 и 2) и для грамотного и точного определения  $T_{\Sigma}$  необходимо знать  $T_0$ , соответствующую  $V_0$ . Величина соотношения  $V_{\Sigma}/V_0 = 1,20 \dots 1,25$ , т. е. эти скорости находятся в пределах одной скоростной ступени универсального станка, а для труднообрабатываемых (жаропрочных, высокопрочных, коррозионностойких) ОМ они практически совпадают (см. рис. 3).

Факт существования оптимальных температур  $\theta_0$  и их инвариантность по отношению к виду обработки открыл возможность определения  $V_0$  для различных видов обработки (фрезерования, нарезания резьбы, протягивания, строгания и др.) лишь на основе температурных исследований и имеющихся данных  $V_0$  для какого-либо одного вида обработки, например, для точения. Реализация идей использования рекомендаций по РОР, установленным для какого-то одного вида обработки, и получения рекомендаций для других видов обработки резанием давно была целью исследователей [1-3, 5-8, 19-25]. Но эта задача оказалась чрезвычайно сложной и не могла быть решена путём использования традиционных методов (модель Ф. Тейлора, Колдинга и др.), а решается методами теории подобия Силина С. С. [3, 7, 8, 11-14]. Определение обрабатываемости при использовании скорости  $V_T$ , соответствующей реальному периоду стойкости  $T$ , исходя из равенства  $\theta_0$  для различных видов обработки (точения, строгания, торцового фрезерования и др.)  $V_0$  для любого вида обработки легко осуществить на основе кратковременных температурных исследований резания данным ТР УРИ [2-5, 7, 8, 13-15].

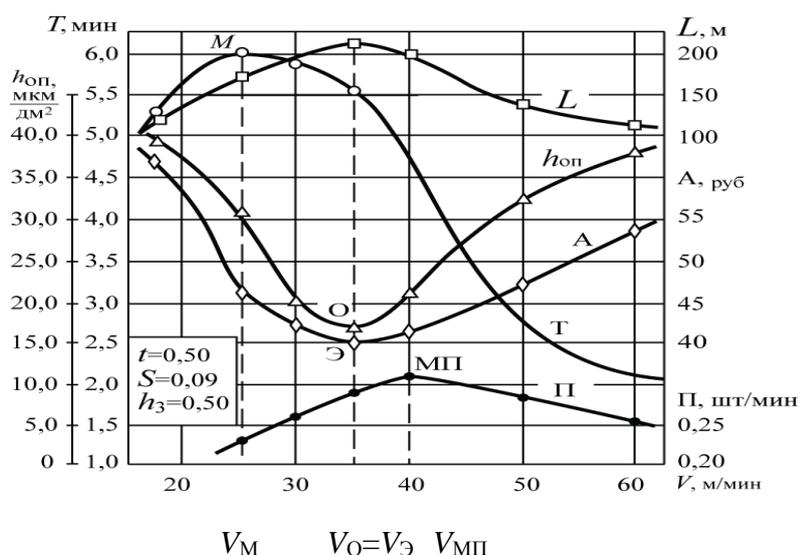


Рисунок 3. Влияние  $V$  на параметры процесса резания при точении жаропрочного сплава ХН60ВМТЮ (ЭП212) наружным унифицированным резцом с РЭ из т/с ВК60М [13].

Считается, что эффективная эксплуатация станков с ЧПУ возможна только с адаптивным управлением [2-5, 9-12]. И это, правильно, если нет квалифицированных инженеров-технологов и наладчиков станков. Хотя будущее, конечно, за адаптивным управлением, которому надо «научить» станки с ЧПУ, - это наукоёмкая задача направления развития *Индустрия 3.0*. Без решения задач *Индустрии 3.0* невозможно развить концепцию *Индустрии 4.0* [15-21, 26]. Но и адаптивное управление процессом резания по одному критерию - произвольно выбранному значению термо-ЭДС (ТЭДС) может привести к плохим результатам, так как одному и тому же значению ТЭДС при различных комбинациях элементов РР:  $t$ ,  $S$ ,  $V$  могут соответствовать резко (до 5 раз) отличающиеся по величине периоды стойкости  $T$  РИ [2-5, 8, 13, 22-24].

Для труднообрабатываемых материалов (36НХТЮ, ХН77ТЮР, ХН60ВМТЮ, ХН67ВМТЮЛ, 38ХНЗМФА, ВТ14) скорости резания  $V_0$  обеспечивают и наименьшую себестоимость обработки, т. е. они являются экономически выгодными скоростями  $V_Э$ . Необходимо отметить, что, чем ниже (хуже) обрабатываемость металла резанием, тем более резко выражен экстремальный характер зависимости себестоимости обработки от скорости резания  $A = f(V)$ , тем ближе к единице величина отношения  $V_Э / V_0$  (см. рис. 3).

Оптимальные скорости резания  $V_0$ , будучи связанными через оптимальную температуру контакта  $\theta_0$  с механо – физико - химическими константами ОМ и ИМ, значительно легче поддаются экспериментальному и расчётному определению. Особенно эффективным оказалось совместное использование закона постоянства температуры  $\theta_0$  и математических методов планирования эксперимента [2-8, 24, 25].

### 3. Выводы

1. Работу на скорости  $V_M$  надо признать нерациональной, - здесь наблюдаются низкая производительность  $\Pi$  и пониженная размерная стойкость  $L$  (высокая  $h_{оп}$ ), себестоимость обработки  $A$  и расход РИ (УРИ) являются высокими.

2. При работе на скорости  $V_0$  достигается наивысшая размерная стойкость РИ, а его расход и погрешность обработки, связанные с износом РИ – минимальны.

3. Работа на скорости  $V_Э$  вместо  $V_0$  приводит к некоторому снижению себестоимости обработки и размерной стойкости РИ, а его расход возрастает.

4. Повышение скорости до  $V_{МП}$  приводит к незначительному повышению П на данном переходе (рабочем месте) за счёт резкого повышения  $h_{оп}$  (расхода РИ) и себестоимости изготовления деталей. Проведенные для различных ОМ расчёты  $V_Э$  показывают, что, как правило  $V_Э = (1,2 \dots 1,25) \cdot V_0$ , т. е. скорости  $V_0$  и  $V_Э$  находятся в пределах одной скоростной ступени универсального станка, а для труднообрабатываемых ОМ они практически совпадают (см. рис. 3). Это обстоятельство было ранее и является сейчас дополнительным стимулом для расширения исследований оптимизации конструкции УРИ, процессов резания и автоматизированного ведения обработки на режимах оптимального резания [15].

5. Рассмотренный закон и алгоритм определения РОР является логической и методической основой разработки подсистемы оптимизации и принятия технологических решений в системе многоуровневой базовой групповой технологии [2,5-7, 11, 13, 15].

#### ЛИТЕРАТУРА:

1. Звонцов, И. Ф. Разработка управляющих программ для станков с ЧПУ: учебное пособие. – 2-е изд., стер / Звонцов И.Ф., Иванов К. М., Серебrenицкий П. П. // Учебники для вузов. Специальная литература – СПб.: Издательство «Лань», 2018. – 588 с.

2. Макаров, А. Д. Оптимизация процессов резания / А. Д. Макаров. – М.: Машиностроение, 1976. – 278 с.

4. Силин, С. С. Методы подобия при резании металлов / С. С. Силин. – М.: Машиностроение, 1979. – 152 с.

5. Макаров, А. Д. Износ и стойкость режущих инструментов / А. Д. Макаров. – М.: Машиностроение, 1966. – 264 с.

6. Ракунов, Ю. П. Управление качеством токарной обработки высокоточных деталей машин / Ю. П. Ракунов // Научноёмкие технологии в машиностроении. – № 2. – 2013. – С. 36-48.

7. Ракунов, Ю. П. Оптимизация синтеза инструментальных наладок для станков с ЧПУ / Ю.П. Ракунов // Журнал «Конструктор-машиностроитель». 2010. – № 3, 5.

8. Ракунов, Ю. П. Первичная подсистема многоуровневой базовой технологии / Ю. П. Ракунов // Научноёмкие технологии в машиностроении. – № 3, 2012. – С. 23-31.

9. Ермаков, Ю. М. Выбор оптимальной скорости резания на основе стойкостной зависимости для режущего инструмента / Ю. М. Ермаков. – М.: ВНИИТЭМР, 1986. – 64 с.

10. Митрофанов, С. П. Групповая технология машиностроительного производства: в 2-х т.Т.1 / С.П. Митрофанов // Организация группового производства. – Л.: Машиностроение. Ленингр. отд. 1983. – 407 с.

11. Технология и организация группового машиностроительного производства: в 2-х ч. Ч.1 Основы технологической подготовки группового производства / С. П. Митрофанов, А. Г. Братухин, О. С. Сироткин и др. – М.: Машиностроение, 1992. – 480 с.

12. Ракунов, Ю.П. Разработка САПР оптимальных групповых процессов токарной обработки на станках с ЧПУ / Ю. П. Ракунов, В. В. Абрамов // Справочник, Инженерный журнал, приложение. – № 7, 2015. – С. 1-29.

13. Справочник технолога // Под ред. А. Г. Сулова. – М.: Машиностроение, 2019. – 678 с.
14. Ракунов, Ю. П. Роль скорости резания и радиуса округления режущего клина в эффективности тонкой механической обработки труднообрабатываемых материалов / Ю.П. Ракунов, В. В. Абрамов, А. Ю. Ракунов // Журнал «Станкоинструмент». – 2020. №1. – С. 66-72.
15. Копылов, Ю. Р. Компьютерные технологии в машиностроении (практикум + CD): учебное пособие / Ю. Р. Копылов. – Воронеж: Изд.-полиграф. центр «Научная книга», 2012. – 508 с.
16. Патент 2226453 РФ, Многократно перетачиваемый резец: / Ракунов Ю.П., Хрульков В. А., Золотова Н. А., Тихонов Н. А. – Бюл. № 10, 2004.
17. SURFCAM Velocity: автоматизированная подготовка управляющих программ многокоординатной обработки на станках с ЧПУ// САПР и графика. – 2005. – № 11.
18. Калачев, О. Н. Моделирование в CAD/CAM Cimatron механообработки на станках с ЧПУ/ О.Н. Калачев. – Ярославль: Ярославский государственный технический университет., 2013. – 30 с.
19. Основные направления развития систем программного управления в мире. [Электронный ресурс] – режим доступа: <http://www.mashcon.ru/article/21>.
20. Machining: fundamentals and recent advances / Ed. J. Paulo Davim. Springer, 2008. – 361 p.
21. Klocke F. Manufacturing Processes. Cutting. Springer, 2011. – 500 p.
22. Sandvik Coromant. Рекомендации по режимам резания. Токарная обработка. <http://www.coroguide.com/CuttingDataModule/CDMTurning.asp>. (дата обращения 24.12.2018).
23. Грубый, С. В. Оптимизация процесса механической обработки и управление режимными параметрами / С. В. Грубый. – М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2014. – 149 с.
24. Кугультинов, С. Д. Технология обработки конструкционных материалов: учебник для вузов / С. Д. Кугультинов, А. К. Ковальчук, И. И. Портнов. – Изд. 3-е, перераб. и доп. – М.: Изд-во МГТУ им. Н. Э. Баумана. 2010. – 678 с.
25. Старков, В. К. Физика и оптимизация резания металлов. – М.: Машиностроение, 2009. – 409 с.
26. Ермаков, Ю. М. Комплексные способы эффективной обработки резанием: Библиотека технолога. – М.: Машиностроение, 2003. – 272 с.
27. Шваб, К. Четвёртая промышленная революция / Пер. с англ. – М.: Эксмо, 2016. – 208 с.

Поступила в редколлегию 17.05.2020 г.