

УДК 621.9.025

**Ю. П. Ракунов**, к.т.н., доц., **В. В. Абрамов**, д.т.н., проф., **А. Ю. Ракунов**, инженер.  
НИУ Московский государственный строительный университет, Россия  
Телефон: +7 (916) 8107126; E-mail: [Rakunov1991@mail.ru](mailto:Rakunov1991@mail.ru)

## ИССЛЕДОВАНИЕ РЕЖУЩИХ СВОЙСТВ ОТЕЧЕСТВЕННЫХ ТВЁРДЫХ СПЛАВОВ ДЛЯ УНИФИЦИРОВАННОГО ИНСТРУМЕНТА И ВЫБОР ПАРЫ МАТЕРИАЛОВ ПРИ ТОЧЕНИИ ЖАРОПРОЧНЫХ СПЛАВОВ.

*В статье рассмотрены научно обоснованные 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. Разобрана методика назначению подач и оптимальных скоростей резания по созданным в первичной подсистеме таблицам-матрицам многоуровневой базовой технологии, основанным на законе постоянства оптимальной температуры резания, обеспечивающим максимальную стойкость инструмента, наивысшую точность обработки при оптимальной скорости резания, как для конструкционных, легированных, так и жаропрочных, коррозионностойких, закаленных, титановых и других труднообрабатываемых материалов. Исследованы режущие свойства и стойкостные характеристики ряда отечественных твёрдых сплавов для изготовления многократно перетачиваемых режущих элементов запатентованных унифицированных резцов при чистовом и финишном точении жаропрочных сплавов на никелевой основе. Эти твёрдые сплавы изучены в сравнении с рекомендуемыми иностранными фирмами-изготовителями резцов с СМП для аналогичного применения, например, для точения жаропрочного сплава Inconel 718 (XH45MBTЮБР)*

**Ключевые слова:** оптимальная температура и скорость резания, унифицированный режущий инструмент, твёрдые сплавы, режимы оптимального резания, интенсивность относительного поверхностного износа.

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

## INVESTIGATION OF CUTTING PROPERTIES OF DOMESTIC HARD ALLOYS FOR A UNIFIED TOOL AND SELECTION OF A PAIR OF MATERIALS IN TURNING HEAT-RESISTANT ALLOYS.

*The article discusses scientifically based technical approaches to the problem of determining feeds and cutting speeds that ensure the minimum intensity of dimensional wear of cutters when turning the working surfaces of machine parts and devices with a unified carbide tool on universal machines, longitudinal turning machines and CNC machines. The technique for assigning feeds and optimal cutting speeds according to the matrix tables of multilevel basic technology created in the primary subsystem, based on the law of constancy of the optimal cutting temperature, providing maximum tool life, the highest machining accuracy at the optimal cutting speed, both for structural, alloyed, and heat-resistant, corrosion-resistant, hardened, titanium and other hard-to-machine materials. The cutting properties and resistance characteristics of series domestic hard alloys for the manufacture of repeatedly regrinded cutting elements of patented unified cutters in the finishing and finishing turning of nickel-based heat-resistant alloys have been studied. These hard alloys were studied in comparison with those recommended by foreign manufacturers of cutters with SMP for similar applications, for example, for turning heat-resistant alloy Inconel 718 (XH45MBTЮБР).*

**Keywords:** optimal cutting temperature and speed, unified cutting tool, domestic hard alloys, optimal cutting conditions, relative surface wear rate.

### 1. Введение

До настоящего времени, к сожалению, совершенно научно не обосновано, основной характеристикой обрабатываемости труднообрабатываемых материалов (ТОМ), сталей и жаропрочных сплавов резанием, является скорость резания  $V_T$ , соответствующая заданному или произвольно выбранному периоду стойкости  $T$  [1-3]. Однако теоретически было обосновано и доказано [4-6], а затем экспериментально подтверждено [3-10], что за основные критерии обрабатываемости необходимо принимать оптимальную

скорость резания  $V_O$ , физически соответствующую *оптимальной температуре в зоне резания*  $\theta_O$  и величину *оптимального поверхностного относительного износа*  $h_{опo}$  (мкм/дм<sup>2</sup>).

Эти критерии по сравнению с  $V_T$  обладают неоспоримыми объективными преимуществами:

1)  $V_O$  соответствует критической точке (минимума) на кривой  $h_{оп} = f(V)$ , в то время как  $V_T$  ни с какой критической точкой зависимости  $T = f(V)$  не связана (см. рис. 1). В работах [3-6,8-10,14,24] показано, что  $V_O = V_{Э}$  для ТОМ, в т. ч. жаропрочных сплавов и материалов.

2)  $V_O$  при работе на различных подачах  $S$  для данной пары материалов: обрабатываемого (ОМ) и инструментального (ИМ) в режущем инструменте (РИ) или унифицированном РИ (УРИ) соответствует постоянная  $\theta_O$ , в то время как скоростям резания  $V_T$  для разных  $S$  в общем случае *не* соответствуют постоянные температуры резания.

График, подтверждающий справедливость положения о постоянстве  $\theta_O$  при точении стали 13X14H3B2ФР (ЭИ736) резцом унифицированным наружным (РУН) (державка 20x20 мм) с режущим элементом (РЭ) Ø7 мм из твёрдого сплава (т/с) Т14К8, приведён на рис. 2.

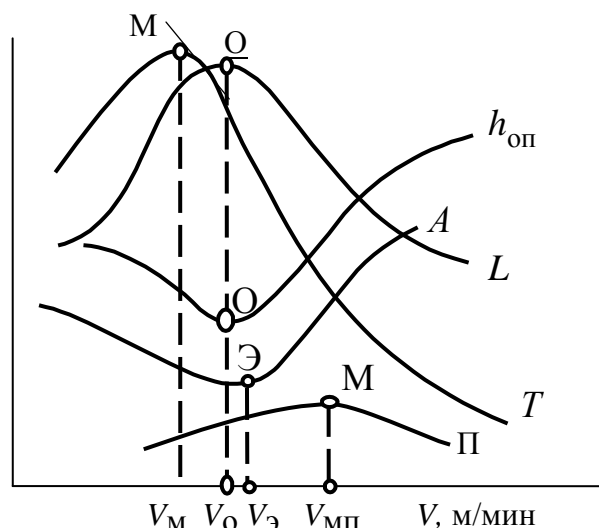


Рисунок. 1. Схема влияния скорости резания на период стойкости  $T$ , путь резания  $L$ , интенсивность размерного износа РИ  $h_{оп}$ , себестоимость  $A$  и технологическую производительность обработки  $\Pi$  (по Макарову А.Д.).

При назначении режимов оптимального резания (РОР) вначале необходимо сделать обоснованный выбор оптимальной (наилучшей) марки ИМ. Поэтому определение режущих свойств отечественных запатентованных унифицированных резцов с РЭ из т/с по сравнению широко рекламируемыми сменными многогранными неперетачиваемыми пластинами (СМП) для токарного и фрезерного РИ является актуальным вопросом, на который надо дать аргументированный ответ с целью обоснованного импортозамещения в металлообработке и высокотехнологичном машиностроении [10-14].

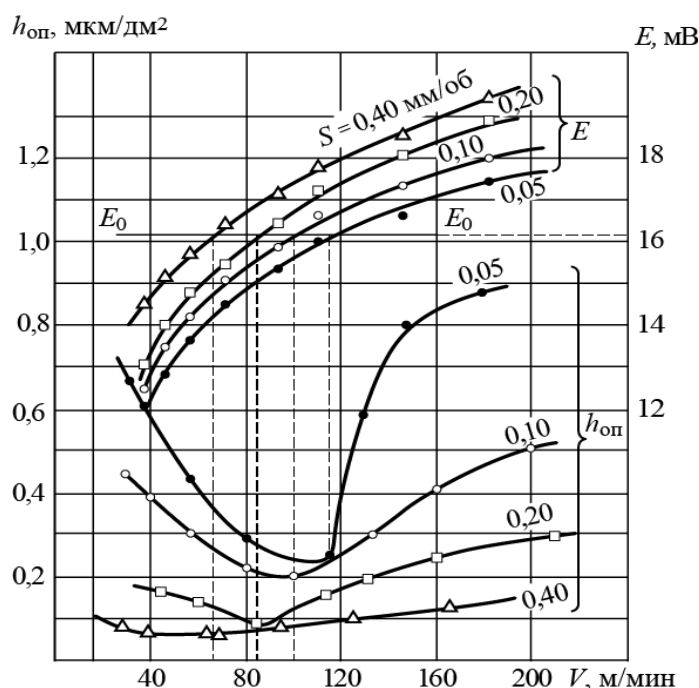


Рисунок 2. Влияние скорости резания на величину  $\theta_0$  (ТЭДС) и  $h_{оп}$ ,  $t=1$  мм. РУН с РЭ  $\varnothing 7$  мм,  $R = 0,3$  мм

**Цель настоящей работы** – исследование режущих свойств и стойкостных характеристик широко известных отечественных т/с ИМ, используемых для изготовления многократно перетачиваемых РЭ УРИ (патент РФ) при чистовом и финишном точении ряда жаропрочных сплавов на никелевой основе. Отечественные твёрдые сплавы должны быть изучены в сравнении с рекомендуемыми различными иностранными фирмами-изготовителями резцов с СМП для аналогичного применения, например, для точения сплава Inconel 718 (отечественный аналог – жаропрочный сплав ХН45МВТЮБР).

## 2. Основное содержание и результаты работы

Испытанию были подвергнуты резцы унифицированные наружные (РУН) с размерами державки 20x20 мм длиной 120 мм; РЭ  $\varnothing 7$  мм составные с регулируемым стружколомом из следующих т/с: ВК3, ВК6, ВК6М, ВК6ОМ, ВК8, ВК10ОМ, ВК10ХОМ, ВК15ОМ, ВРК15; Т15К6, Т14К8, Т5К10, ТТ8К6, ТТ10К8Б, ТТ20К9 со следующей геометрией:  $\rho = 5 \dots 10$  мкм,  $\gamma = 10 \dots 15^\circ$ ;  $\alpha = \alpha_1 = 10^\circ$ ;  $\lambda = 2 \dots 5^\circ$ ;  $\varphi = \varphi_1 = 45^\circ$ ;  $R = 0,4$  мм;  $t = 0,5$  мм.

Режущие свойства ИМ оценивались критериями размерной стойкости, оптимальной скорости резания и производительностью чистовой обработки точением. Испытания проводились на токарно-винторезном станке высокой точности ТПК-125ВН2 с бесступенчатым регулированием чисел оборотов шпинделя главного движения. Режимы резания: подача  $S_0 = 0,1$  мм/об, глубина резания  $t = 0,5$  мм, скорость резания изменялась от 8 до 75 м/мин (от 0,13 до 1,25 м/с). Критерием затупления служил износ по задней грани  $h_3 = 0,5$  мм, размерный износ, соответственно, был равен  $h_r = 0,125$  мм.

Исследования показывают, что зависимости длины пути резания ( $L$ , м) и удельной размерной стойкости ( $T_{урз}$ ,  $дм^2/мм$ ) от скорости резания носят горбообразный характер, причем для т/с группы ВК с одним, а для т/с группы ТК и ТТК – с

двумя экстремумами (см. рис 3 и 4). Первый максимум у двугорбых кривых  $L=f(V)$  и  $T_{урз}=f(V)$  объясняется явлением устойчивого наростообразования [5,6]. Максимум размерной стойкости для т/с группы ВК, а также второй максимум для сплавов ТК и ТТК связаны с изменением вклада различных механизмов износа в общий (суммарный) износ РИ [4,5,10,11].

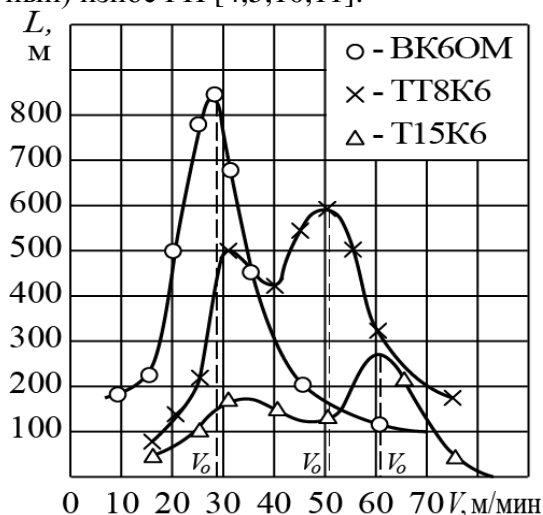


Рисунок 3. Зависимость длины пути резания от скорости резания при точении РУН жаропрочного сплава ХН73МБТЮ.

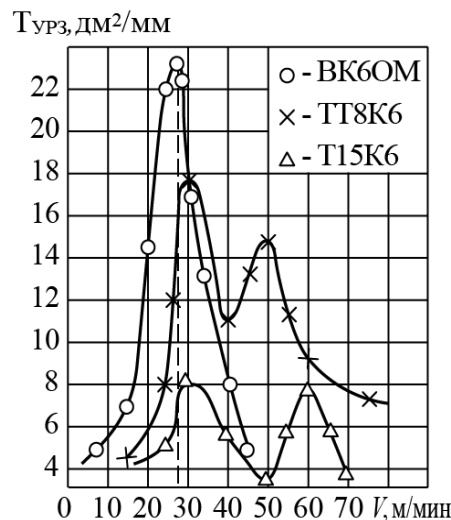


Рисунок 4. Влияние скорости резания на удельную размерную стойкость РУН.

Оптимальные скорости резания  $V_0$ , соответствующие максимуму размерной стойкости, для т/с группы ВК изменяется от 18 до 37 м/мин, а для группы ТК и ТТК составляет 25...60 м/мин при чистовом точении сплава ХН73МБТЮ. Для всех ИМ в пределах каждой группы уровень  $V_0$  зависит от содержания кобальта (Со): чем больше связующей фазы в т/с, тем ниже  $V_0$ . Так, в группе ВК сплаву ВК3М, содержащему 3% Со, соответствует  $V_0 = 40$  м/мин; по мере увеличения содержания Со у т/с ВК6 и ВК8  $V_0$  снижается до 28 и 22 м/мин соответственно. Аналогичное снижение  $V_0$  наблюдается для т/с групп ТК и ТТК и особомелкозернистых сплавов (см. табл. 1). Легирование т/с карбидом (TaC), так же, как и изменение размеров зерна, оказывает определённое влияние на  $V_0$ . Показатели размерной стойкости ( $T_{урз}$  или  $h_{опз}$ ) в значительной степени от состава т/с: так с увеличением содержания Со в т/с группы ВК от 3 до 10%  $T_{урз}$  увеличивается до 6 раз. Уменьшение размера зерна способствует повышению размерной стойкости, при этом снижается и приработочный износ, что особенно ярко проявляется для РЭ унифицированных резцов с доведёнными рабочими (передними и задними) поверхностями алмазными пастами после заточки алмазными кругами в многоместных приспособлениях [7-9,14-17] (см. рис 5).

Таблица 1. Показатели оптимальной скорости, периода стойкости, интенсивности износа и пути резания при оптимальной температуре в зоне резания отечественных ИМ при чистовом точении жаропрочных сплавов ХН73МБТЮ (ЖПС1) и ХН45МВТЮБР (ЖПС2).

Твердый сплав	L, м ЖПС1/ЖПС2	Оптимальная скорость $V_o$ , м/мин	$T_o$ , мин при $h_z = 0,5$ мм ( $K=1,15$ )	Интенсивность износа $h_{опз}$ , мкм/мм <sup>2</sup>	Оптимальная температура $\Theta_o$ , °C
ВК3	200 / 278	37 / 45	5,4 / 6,2	16,1 / 11,6	730 / 752
ВК4	130 / 180	35 / 42	3,7 / 4,3	24,8 / 17,8	710 / 130
ВК6	445 / 620	28 / 33	15,9 / 18,8	9,3 / 6,7	670 / 690
ВК6М	636 / 885	28 / 33	22,7 / 26,8	6,5 / 4,7	670 / 690
ВК8	410 / 570	22 / 26	18,6 / 21,9	4,8 / 3,5	620 / 640
ВК6ОМ	850 / 1180	28 / 33	30,4 / 35,7	3,8 / 2,7	650 / 670
ВК10ХОМ	1300 / 1800	25 / 30	52 / 60	2,9 / 2,1	630 / 650
ВК15ОМ	525 / 730	18 / 22	29,2 / 33,2	7,3 / 5,3	610 / 628
ВРК15	1625 / 2250	35 / 42	46,4 / 53,6	2,33 / 1,68	780 / 800
Т15К6	265 / 368	60 / 66	4,42 / 5,6	13 / 9,4	880 / 906
Т14К8	250 / 347	40 / 44	6,25 / 7,9	13 / 9,4	790 / 814
Т5К10	115 / 160	25 / 28	4,6 / 5,7	14,1 / 10,1	650 / 670
ТТ8К6	590 / 820	50 / 55	11,8 / 14,9	8,5 / 6,1	800 / 824
ТТ10К8Б	285 / 396	36 / 38	8,1 / 10,4	17,5 / 12,6	710 / 730
ТТ20К9	260 / 360	30 / 33	8,67 / 10,9	19,2 / 13,8	690 / 710

Особомелкозернистые сплавы группы ВК (ВК6ОМ, ВК10ОМ, ВК10ХОМ), а также т/с ТТ8К6 (содержащий 2% ТаС) и сплав ВРК15, содержащий до 9% редкозе

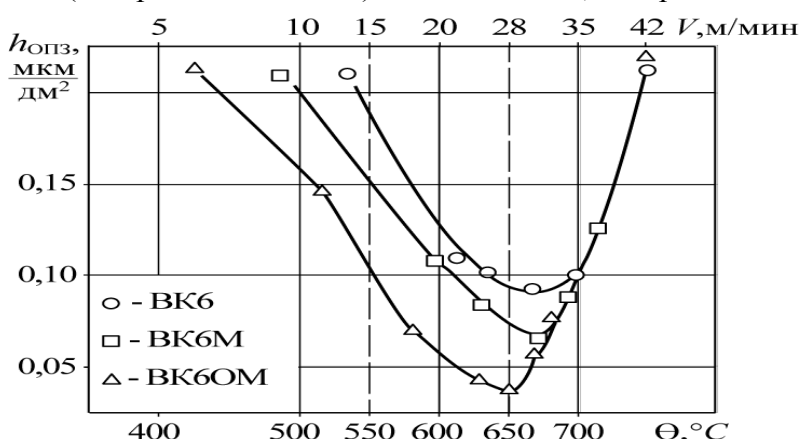


Рисунок 5. Зависимость поверхностного относительного износа от скорости и температуры резания при чистовом точении сплава ХН73МБТЮ резцом РУН из т/с группы ВК.

мельного элемента рения (Re), показали существенное повышение размерной стойкости. Так, если при уменьшении среднего размера зерна от 2 мкм (т/с ВК6) до 1,7 мкм (ВК6М) длина пути резания  $L$  при заданном критерии затупления ( $h_3 = 0,5$  мм) увеличивается на 10%, то при уменьшении среднего размера зерна введением ТаС до 1,3 мкм  $L$  повышается до 2-х раз, а введение Re в сплав ВК15ОМ повышает  $L$  более чем в 3 раза. Очевидно, при обработке жаропрочных сплавов на никелевой основе унифицированными резцами (патент РФ) с РЭ из особомелкозернистых т/с имеет место иной механизм износа по сравнению с инструментами, использующими СМП из бестанталовых или безрениевых т/с (рис 6 и 7).

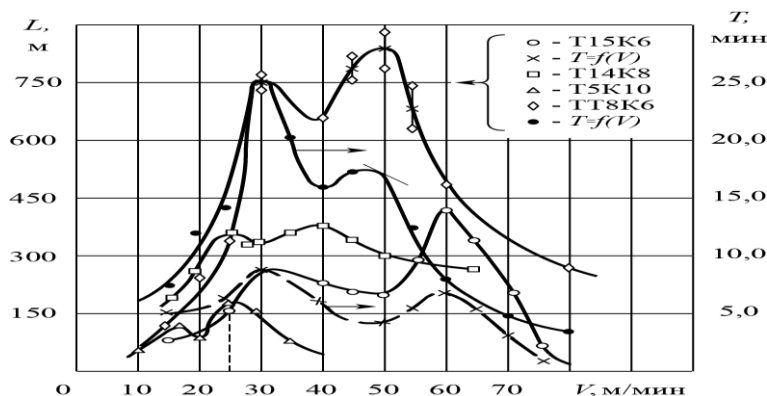


Рисунок 6. Зависимость длины пути резания от скорости резания при чистовом точении сплава ХН73МБТЮ РУН с РЭ (составными с регулируемым стружколомом) из различных т/с группы ТК и ТТК.

Введение ТаС или Re (хотя и в небольших количествах) в т/с группы ВК нужно рассматривать не только как фактор, препятствующий росту зёрен при спекании, но и как способ получения т/с нового качества. Доводка рабочих поверхностей режущего клина РЭ устраняет дефектный слой с сеткой микротрещин, неизбежно появляющийся после спекания т/с и/или заточки его алмазными шлифовальными кругами. Доводка позволяет уменьшить до минимума радиус округления режущего клина и коэффициент трения на передней и задней поверхности РЭ, что уменьшает температуру и силы резания при чистовой и финишной механической обработке ТОМ, в том числе жаропрочных, коррозионностойких и титановых сплавов [4,7-11,11,16,17,19].

Исследования адгезионного взаимодействия при различных температурах контакта проводились на приборе, описанном в работе [5], который в отличии от способа [6] позволяет приблизить условия контактирования к реальным условиям резания, получить распределение температур на глубине контактирующих тел, близкое к характеру распределения температуры в контактных слоях РИ и заготовки.

Исследования показали, что кривые длины пути резания в зависимости от скорости резания для унифицированных резцов с РЭ из различных марок т/с, имеют один или два горба (см. рис. 3,4,6 и 7). Для ТК и ТТК сплавов характерна зависимость  $L=f(V)$  с двумя максимумами. Для ВК сплавов кривые  $L=f(V)$  могут иметь один или два горба и в зависимости от содержания Со. При переходе от т/с ВК3, ВК4 в т/с ВК8 наблюдается постепенный переход кривых от двугорбых к одногорбой. Оптимальные скорости, соответствующие максимуму  $L$ , изменяются от 22 м/мин – для сплава ВК8, до 37 м/мин – для ВК3, оптимальные температуры резания – от 620°С до 730°С соответственно. Твёрдые сплавы, содержащие, кроме карбида

вольфрама (WC), карбиды титана (TiC), тантала (TaC) и рения (ReC), имеют повышенные значения оптимальных скоростей резания (табл. 2).

Таблица. 2. Показатели:  $V_o$ , размерной стойкости, интенсивности износа по задней грани и себестоимости обработки отечественными ИМ при чистовом точении РУН жаропрочного сплава ХН73МБТЮ.

Показатели	Г Р У П П А В К							
	Марка твердого сплава							
	ВК3	ВК6	ВК6М	ВК8	ВК6ОМ	ВК10ХОМ	ВРК15	ВК15ОМ
$L$ , м	200	450	490	410	850	1300	1625	525
$V_o$ , м/мин	37	28	28	22	28	25	35	18
$T_{урз}$ , $дм^2/мм$	6,2	10,8	15,4	20,8	23,0	34,4	43	13,7
$A$ , руб	15,8	12,6	12,3	15,0	10,7	10,3	8,2	16,8
$h_{опз}$ , $мкм/дм^2$	16,13	9,3	6,5	4,8	3,8	2,9	2,33	7,3
$h_{опо}$ , $мкм/дм^2$ ( $\alpha=\alpha_1=10^\circ$ )	4,03	2,33	1,63	1,2	0,95	0,725	<b>0,58</b>	1,83

Показатели	Группа ТК			Группа ТТК		
	Марка твердого сплава					
	Т15К6	Т14К8	Т5К10	ТТ8К6	ТТ10К8Б	ТТ20К9
$L$ , м	265	250	115	590	285	260
$V_o$ , м/мин	60	40	25	50	35	30
$T_{урз}$ , $дм^2/мм$	7,7	7,7	7,1	11,8	5,7	5,2
$A$ , руб	10,08	13,2	25,2	<b>7,9</b>	12,8	14,4
$h_{опз}$ , $мкм/дм^2$	13,0	13,0	14,1	8,47	17,54	19,23
$h_{опо}$ , $мкм/дм^2$ ( $\alpha=\alpha_1=10^\circ$ )	3,25	3,25	3,53	2,12	4,39	4,81

Зависимости  $L=f(V)$  и  $L=f(\theta)$  для т/с группы ВК и ТК приведены на рис. 6 и 7.

Наличие первой точки максимума на кривых  $L=f(V)$  и  $L=f(\theta)$  может быть объяснено следующим образом. На интенсивность износа УРИ в этой области резания влияет застойная зона на задней поверхности режущего клина (РК). Поверхность фаски износа УРИ покрыта сплошным слоем ОМ. Подтверждением этому служат данные по исследованию адгезионных явлений между контактирующими материалами: ИМ – ОМ. Именно при температурах контакта 600...650°C для всех ВК-сплавов наблюдается максимум адгезионной составляющей коэффициента трения (см. рис. 7). С увеличением температуры контакта прочность адгезионных связей уменьшается. Застойная зона становится менее стабильной и интенсивность износа УРИ повышается. При дальнейшем повышении температуры контакта при резании прочность адгезионных связей стабилизируется, но одновременно с этим происходит уменьшение прочностных свойств ОМ. Это усиливает застойные явления на контактной поверхности и способствует предохранению задней поверхности от износа. Увеличение отношения (и разности) между микропрочностями приконтактной зоны УРИ и фрикционного контакта также способствует снижению интенсивности износа УРИ.

С увеличением скорости резания против оптимальной интенсивность износа повышается за счёт интенсификации диффузионных явлений [3-6]. Интенсивность диффузионного растворения ИМ зависит от содержания в сплаве кобальта (см. рис. 7). С увеличением доли Со правая ветвь кривой  $h_{опз} = f(\theta)$  смещается в сторону низких температур

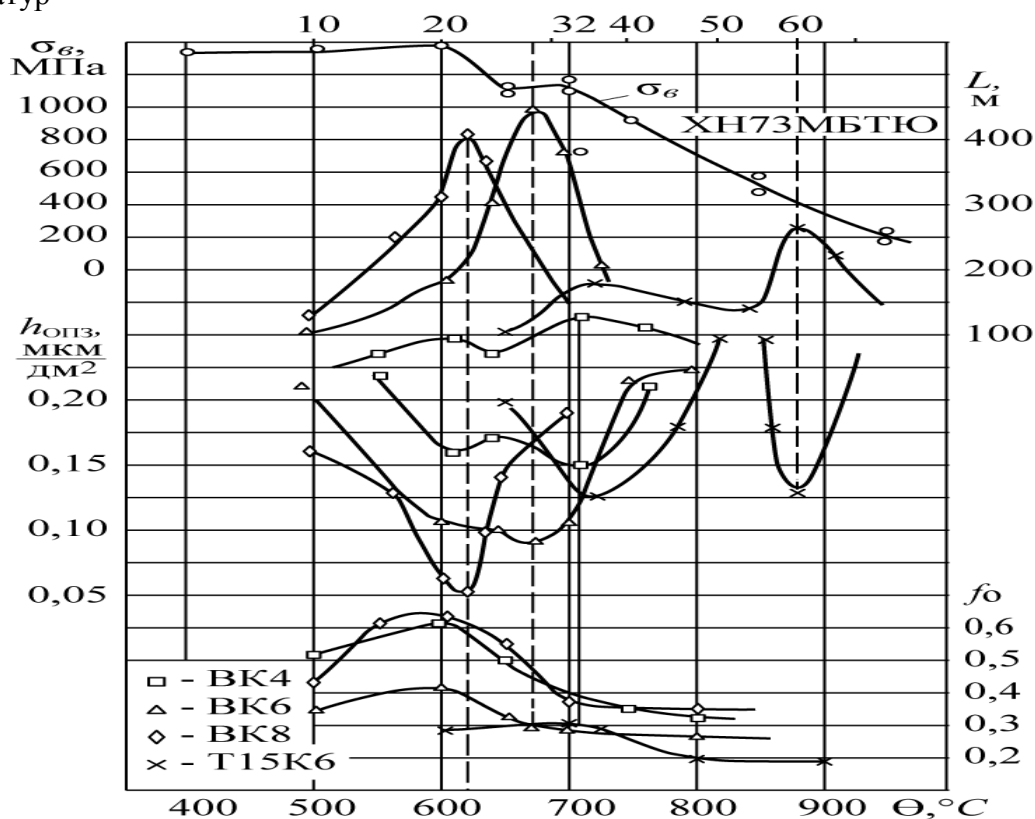


Рисунок 7. Влияние температуры резания на параметры размерной стойкости ( $h_{опз}$  и  $L$ ); температуры испытания на предел прочности сплава ХН73МБТЮ и адгезионную составляющую коэффициента трения контактирующих пар ХН73МБТЮ – твёрдый сплав.

В том случае, когда т/с содержат одинаковое количество связки и отличаются лишь величиной зёрен WC, правые ветви кривых  $h_{опз} = f(V)$  сливаются в одну линию (см. рис. 5). Известно [4-6,16], что кобальтовая связка при резании быстро уносится с приповерхностного слоя РИ. При этом увеличивается поверхность контакта зёрен карбидов с ОМ и тем самым происходит ускорение диффузионного растворения ИМ, содержащих большое количество Со. Для этих сплавов характерно отсутствие седла на кривой  $L=f(V)$ , большая кривизна правой ветви кривой  $h_{опз} = f(\theta)$ , т.е. совпадение зон интенсивного адгезионного и диффузионного износов.

Следовательно, уровни оптимальной температуры  $\theta_0$  и скорости резания  $V_0$  определяется характером изменения величины фрикционной связи в зависимости от температуры и интенсивности диффузионных процессов в контакте пары ИМ-ОМ, а также их высокотемпературными физико-механическими свойствами. Чем выше температура, при которой ещё сохраняется высокая адгезионная активность твёрдого сплава, и чем ниже интенсивность диффузионных явлений, тем выше  $V_0$ . Повышение  $V_0$  может быть достигнуто изменением состава т/с – уменьшением доли Со или добавлением легирующих карбидов.



Так, например, при переходе от т/с ВК8 к сплаву ВК3  $V_O$  повышается в 1,7 раза, а применение т/с Т15К6 вместо ВК6 (при одинаковой доли Со) повышает  $V_O$  в 2,2 раза. Смещение  $V_O$  вправо для сплава Т15К6, очевидно, связано с малой диффузионной способностью TiС по сравнению с никелем [5,16]. Зная характер влияния фазового состава и структуры т/с на уровень  $V_O$  при обработке ТОМ, можно ориентировочно прогнозировать и затем точно рассчитать области нахождения  $V_O$  для различных ИМ.

Преимущества УРИ по стойкости в сравнении с лучшими РИ с СМП, в частности, сплавов Н13А и S05F с покрытием [18,20-24], наглядно иллюстрируется при обработке сплава *Inconel 718 (NiCr19Fe19NbMo DIN)*, широко используемого за рубежом (рис. 8).

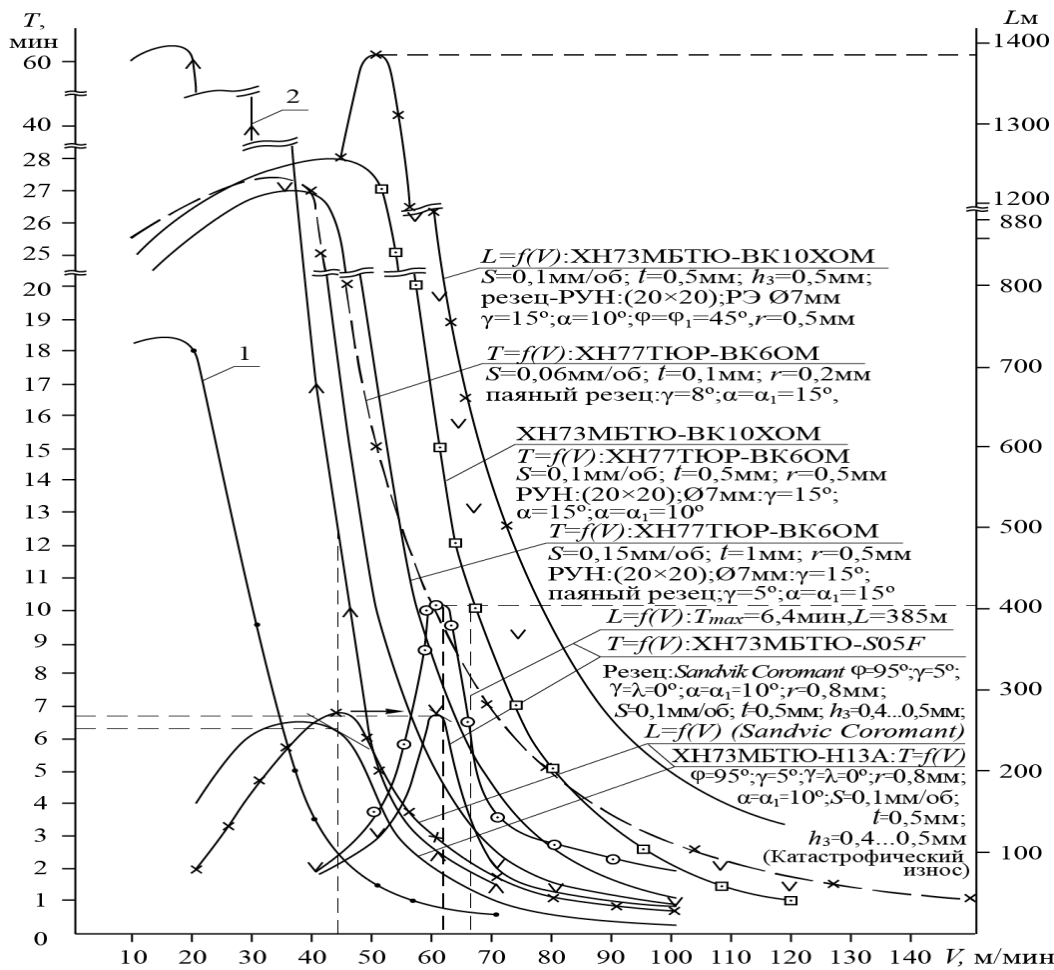


Рисунок 8. Стойкость ( $T$ , мин;  $L$ , м) РИ с механическим креплением: 1) СМП ромбической формы из т/с Н13А и S05F с покрытием (фирмы Sandvic Coromant) при чистовом точении заготовок из жаропрочного сплава XH73МБТЮ; 2) многократно перетачиваемых РЭ из т/с ВК10ХОМ и ВК6ОМ при финишном точении сплава XH77ТЮР; 3) паяными диффузионной пайкой, заточенными и доведёнными алмазными кругами из т/с ВК6ОМ при чистовом и финишном точении сплава XH77ТЮР. РР и геометрические параметры резцов - на рисунке.

Использование УРИ и РОР определяют необходимость оптимизации радиуса округления  $\rho$  режущего клина, который обеспечивает минимизацию сечения среза, особенно, при тонкой (прецизионной), финишной (отделочной) и высокоскоростной обработке ТОМ и закаленных материалов [14,16,19,24]. В качестве технологических

рекомендаций можно и нужно привести график, дающий возможность определить РОР при точении жаропрочного сплава ХН73МБТЮ резцом унифицированным наружным (РУН) с геометрией, указанной на рис. 9.

### 3. Заключение

1. При работе на  $V_0$  достигается наивысшая размерная стойкость УРИ, а его расход и погрешность обработки, связанные с износом РИ – минимальны (см. рис.1,3,4,6,7).
2. Работа на скорости  $V_3$  вместо  $V_0$  приводит к снижению себестоимости обработки и размерной стойкости УРИ, а его расход возрастает. При обработке ТОМ практически в подавляющем большинстве случаев  $V_0 = V_3$ .

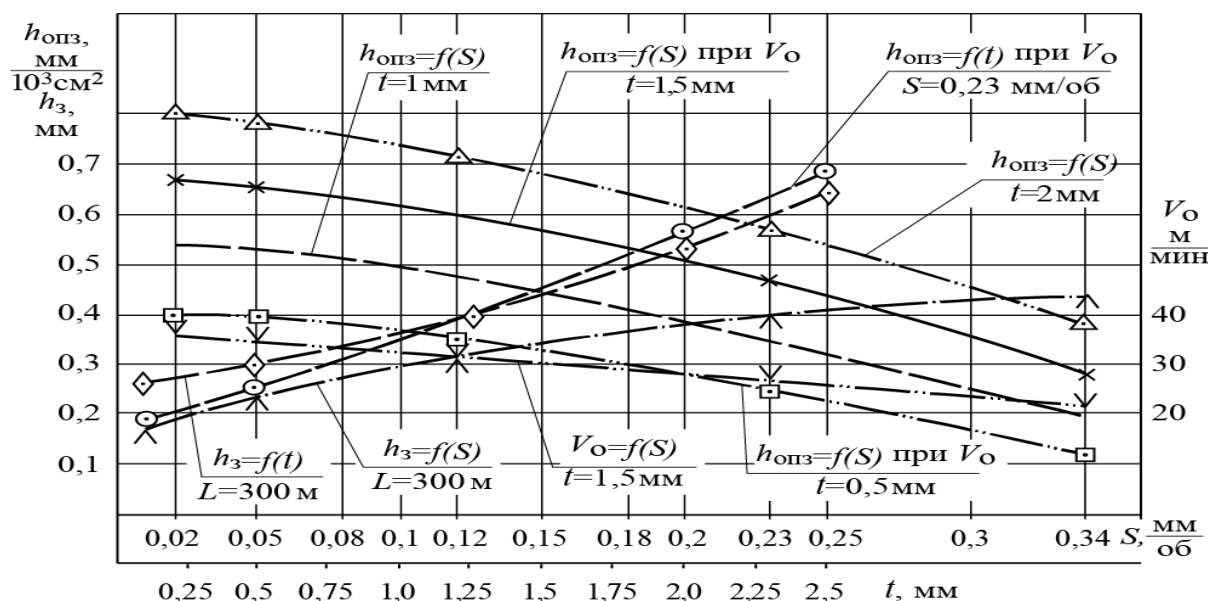


Рисунок 9. Зависимость относительного поверхностного износа  $h_{опз}$ , ширины фаски износа РУН по задней грани  $h_3$  от подачи  $S$  и глубины резания  $t$  при продольном точении; оптимальной скорости резания  $V_0$  от  $S$  при  $t = 1,5$  мм. **Пара материалов:** жаропрочный сплав ХН73МБТЮ – т/с ВК60М; геометрия РУН:  $\rho = 3...5$  мкм при  $S \leq 0,1$  мм/об;  $\rho = 6...10$  мкм при  $0,12 \leq S \leq 0,2$ ;  $\rho = 10...15$  мкм при  $0,2 \leq S \leq 0,35$  мм/об;  $\alpha = \alpha_1 = 10^\circ$ ,  $\gamma = 12^\circ$ ,  $\lambda = -3^\circ$ ,  $R=0,5$  мм,  $\phi = 60^\circ$ ,  $\phi_1 = 30^\circ$ . Переменные параметры:  $V = 15...45$  м/мин;  $S = 0,02...0,34$  мм/об;  $t = 0,1...2,5$  мм.

3. Режущие свойства ИМ при чистовом (финишном) точении жаропрочных сплавов в значительной степени зависит от состава твёрдых сплавов и величины зерна карбидов.
4. На уровень оптимальных скоростей резания главным образом влияет TiC, а внутри группы т/с – содержание связующей фазы. Присутствие карбида TaC в небольших количествах и измельчение величины зерна не оказывает заметного влияния на оптимальную скорость.
5. Повышенную размерную стойкость при точении сплавов ХН73МБТЮ и ХН45МВТЮБР (российский аналог популярного зарубежного жаропрочного сплава Inconel 718) имеют т/с группы ВК, особенно мелкозернистые. Введение в т/с в небольших количествах карбида Ta (TaC) и рения (ReC) приводит к значительному повышению размерной стойкости унифицированного инструмента.

6. При чистовом точении указанных жаропрочных сплавов оптимальными марками ИМ являются т/с, содержащие 2% TaC и около 9% ReC - ТТ8К6, ВК6ОМ, ВК10ОМ, ВРК15.

7. Установлено, что при чистовой обработке точением жаропрочных сплавов на никелевой основе кривые зависимости  $L=f(V)$  могут иметь один или два максимума в зависимости от химического состава ИМ.

8. Для вольфрамокобальтовых т/с (ВК6, ВК6М, ВК6ОМ, ВК8, ВК10ОМ, ВК10ХОМ, ВРК15), наиболее приемлемых для обработки указанных жаропрочных сплавов на никелевой основе, характерны кривые зависимости  $L=f(V)$  с одним максимумом. Оптимальные скорости резания у этих сплавов лежат в области температур, при которых наблюдаются наибольшие застойные явления на задней контактной поверхности УРИ.

9. Знание факторов, влияющих на уровень оптимальных скоростей (температур) резания, даёт возможность целенаправленно проводить работы по изысканию новых ИМ для обработки ТОМ (жаропрочных никелевых сплавов, коррозионностойких сплавов, титановых сплавов, закалённых сталей и др.), обеспечивающих требуемое качество при более высокой производительности и наименьшей технологической себестоимости продукции.

#### ЛИТЕРАТУРА:

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

2. Кугультинов, С. Д. Технология обработки конструкционных материалов: учебник для вузов. Изд. 3-е, перераб. и доп. / С. Д. Кугультинов, А. К. Ковальчук, И. И. Портнов. – М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана. 2010. – 678 с.

3. Силин, С. С. Методы подобиия при резании металлов. М.: Машиностроение, 1979. - 152 с.

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

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

6. Резание материалов. Режущий инструмент: учеб. пособие / В. М. Кишуров, Н. К. Криони, В. В. Постнов, П. П. Черников. 3-е изд., перераб. и доп. – Машиностроение, 2009. – 472 с.

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

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

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

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

12. Воронцов, А. Л. Теоретические основы обработки металлов в машиностроении: монография / Воронцов А.Л. и др. – Старый Оскол: ТНТ, 2020. – 552 с.
13. 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.
14. Справочник технолога. Под ред. А. Г. Сулова. – М.: Машиностроение, 2019. – 678 с.
15. Ракунов, Ю. П. Абрамов В. В., Ракунов А. Ю. Роль скорости резания и радиуса округления режущего клина в эффективности тонкой механической обработки труднообрабатываемых материалов / Ракунов Ю. П., Абрамов В. В., Ракунов А. Ю. // Журнал «Станкоинструмент». – № 1-2. – 2020. – С. 66-72.
16. Копылов, Ю. Р. Компьютерные технологии в машиностроении (практикум+CD): учебное пособие / Ю. Р. Копылов. – Воронеж: Изд.-полиграф. центр «Научная книга», 2012. – 508 с.
17. Старков В. К. Физика и оптимизация резания металлов. М.: Машиностроение, 2009. – 409 с.
18. Ермаков, Ю. М. Комплексные способы эффективной обработки резанием: Библиотека технолога. / Ю.М. Ермаков. – М.: Машиностроение, 2003. – 272 с.
19. Kennametal представляет токарный сплав KCS10B для обработки жаропрочных сплавов. Журнал «Твердый сплав». <http://tverdysplav.ru> (дата обращения 12.10.2020).
20. Ракунов, Ю. П. Номограммы выбора подач и скоростей резания исходя из требуемой шероховатости обработки и износа унифицированных резцов. / Ракунов Ю.П., Абрамов В. В., Ракунов А. Ю. // Междунар. науч. журнал «Школа Науки». – № 11(22), Сентябрь, 2019. – С. 7-12.
- 21 Machining: fundamentals and recent advances / Ed. J. Paulo Davim. Springer, 2008. 361 p.
22. Klocke F. Manufacturing Processes. Cutting. Springer, 2011. 500 p.
23. Технический справочник SANDVIK Coromant: руководство по металлообработке. – М., 2018.
24. Sandvik Coromant. Рекомендации по режимам резания. Токарная обработка. <http://www.coroguide.com/CuttingDataModule/CDMTurning.asp>. (дата обращения 24.12.2018).
25. Ракунов, Ю. П. Критерии обрабатываемости труднообрабатываемых материалов, оптимизация инструмента и режимов резания в прецизионном групповом производстве / Ракунов Ю.П., Абрамов В. В., Ракунов А. Ю. – «Станкоинструмент». № 4, 2021. – С. 62-72.

Поступила в редколлегию 18.02.2022 г.