

УДК 621. 922:621.21

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

Московский государственный строительный университет, НИУ МГСУ, Россия

Тел/Факс: +7 (499) 1834683, +7 (916) 810 71 26; E-mail: Rakunov1991@mail.ru;

ИССЛЕДОВАНИЕ КИНЕТИКИ ИЗНОСА РЕЖУЩЕГО КЛИНА И КОНТАКТНЫХ НАПРЯЖЕНИЙ НА ЕГО РАБОЧИХ ПОВЕРХНОСТЯХ

В статье рассмотрены характер и распределение контактных напряжений на передней и задней поверхностях режущего клина (РК) с учетом величины радиуса округления режущей кромки (ρ) который определяет типоразмер РК совместно с передним и задним углом резца. Рассмотрена кинетика изменения радиуса ρ резцов из сверхтвердых материалов при обработке закаленных сталей. Определены парные корреляционные зависимости между действительной толщиной среза a и ρ_{pr} , обеспечивающие наибольшую прочность РК и ρ_t , соответствующие максимальной стойкости инструмента при тонкой и чистовой обработке труднообрабатываемых материалов, в том числе закаленных сталей и жаропрочных сплавов. Приведены величины нормальных сил, сил трения и удельных нагрузок при точении частично приработанным резцом из композита 01 закаленной стали ХВ1Г. Исследован характер изменения нормальных и касательных напряжений с повышением скорости резания и подачи на оборот. Даны рекомендации по оптимальному назначению сечения среза a тонкого точения при значении радиуса округления режущих кромок РЭ резцов унифицированных конструкций.

Ключевые слова: режущий клин, контактные напряжения, радиус округления, толщина среза, оптимизация параметров РК, кинетика износа, резец из сверхтвердых материалов.

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

RESEARCH OF THE KINETICS OF WEAR OF THE CUTTING WEDGE AND CONTACT STRESSES ON ITS WORKING SURFACES

The article discusses the nature and distribution of contact pressure on the front and rear surfaces of the cutting wedge (CW) given the radius of the rounding of the cutting edge (ρ) which determines the size of CW together with the front and rear corner cutter. The kinetics of the radius ρ cutters from superhard materials in the processing of hardened steels. Determined pair correlations between actual slice thickness a and ρ_{st} and providing the greatest strength and ρ_d of CW, the corresponding maximum tool life for fine and finishing hard materials, including hardened steels and superalloys. Given the magnitude of normal forces, friction forces and specific loads at run-cutter turning part of a composite 01 hardened steel HV1G. The character of changes in the normal and shear stresses with increasing cutting speed and feed per revolution. Recommendations are given on the optimal assignment of the cut section of fine turning at the value of the rounding radius of cutting edges of cutters of unified designs.

Keywords: cutting wedge, contact stresses, rounding radius, slice thickness, optimization of the parameters of the CW, the kinetics of wear, the tool of superhard materials.

1. Введение

Исследование характера и распределения контактных напряжений на передней и задней поверхностях режущего клина не может быть достоверно проведено без учёта (рассмотрения) величины радиуса ρ округления режущей кромки. Это относится ко всем без исключения материалам РИ, т.к. определяет как статическую, так и динамическую прочность режущего клина во всём рабочем диапазоне режимов резания.

Во главе угла, т.е. режущего клина (РК) стоит радиус округления этого клина (режущей кромки) ρ , который и определяет типоразмер РК совместно с передним углом γ и задним углом α , а также параметрами шероховатости всех поверхностей РК,

как на передней (режущей), так и задней (трущейся) поверхности и линии их пересечения.

2. Постановка задачи

Резцовые цилиндрические вставки и неперетачиваемые двухсторонние пластины из композитов на инструментальных заводах не затачиваются специально (под микроскопом) с заданными радиусами ρ , то есть ρ вставки или пластины получается самопроизвольно (случайным образом) при выполнении заточки резцовой вставки или спекания круглой двухсторонней неперетачиваемой пластины в пресс-форме. Таким образом, важнейший (определяющий) параметр типоразмера режущего клина ρ в процессе изготовления не контролируется. Видимо, при спекании пластин получается такой ρ , который выполнен при изготовлении пресс-формы для формования СТМ, если он не затачивается по передней поверхности и по цилиндрической поверхности, образующей круговую режущую кромку.

Задачей исследования является изучение кинетики изменения радиуса ρ резцов из сверхтвёрдых материалов (СТМ) при обработке закаленных сталей, установление корреляционных зависимостей между действительной толщиной среза и радиусом округления, а также исследование закономерностей изменения сил и удельных нагрузок на передней и задней поверхностями РК от скорости резания и подачи на оборот при точении закаленных высокопрочных, твердых сталей и труднообрабатываемых материалов (ТОМ).

3. Решение задачи

По данным [1] оптимальные геометрические параметры РК резцов из СТМ: композитов 01, 02 и 10 характеризуются отрицательным передним углом $\gamma = -(6...12)^\circ$, задним углом $\alpha = 6...12^\circ$ при угле заострения $\beta = 90^\circ$. Радиус округления ρ резцов, заточенных алмазными кругами средней и мелкой зернистости, получается в диапазоне $\rho_0 = 10...20$ мкм. В начальный период приработки до износа по заднее грани $h_z = 0,1$ мм ρ увеличивается до $\rho_n = 25...30$ мкм и стабилизируется в нормальный период износа до $h_{zn} = 0,4...0,6$ мм, когда начинается катастрофический износ и качество обработки закалённых заготовок переходит на неприемлемый уровень (ниже допустимого). Доводка и полирование передней и задней поверхности, когда неизбежно обрабатывается свободным абразивом и радиус перехода (пересечения) этих поверхностей, позволяет уменьшить шероховатость всего режущего клина на 2...3 класса до значения $R_a < 0,04...0,08$ мкм ($R_z < 0,2...0,4$ мкм), что обеспечивает получения значения $\rho = 5...10$ мкм. Такой режущий клин (РК) имеет уже другой типоразмер и повышает эффективность тонкой обработки с сечением среза $a = 0,04...0,05$ мм (40..50 мкм) и увеличивает стойкость РК в 1,5...2,5 раза в результате снижения интенсивности адгезионных явлений в зоне контакте стружки и обрабатываемого материала (ОМ) с радиусом округления и поверхностями РК.

Таким образом, ρ РИ из СТМ изменяется в процессе резания одновременно с увеличением фаски износа по задней и передней поверхности РК и его величина зависит от первоначального ρ_0 и времени работы инструмента. При определённых условиях резания ρ увеличивается до 25...30 мкм, а затем стабилизируется на этом уровне, практически не изменяясь в течение всего периода стойкости, независимо от режимов резания (глубины t , подачи S_0 и скорости V_p). Радиус ρ всегда коррелирует с

толщиной среза a , которая зависит от подачи S_0 , глубины резания t и геометрии в плане (ϕ , r и ϕ_1) РИ. (см. рис. 1)

Рыкунов А. Н. в исследованиях процесса тонкого точения [2] установил, что средний радиус ρ для киборита (СТМ на основе ПКНБ) при сечениях среза $a = 25 \dots 30$ мкм должен составлять $\rho_{\text{ср}} = 3,0$ мкм. Автор при этом указывает, что «важнейшую роль в процессе тонкого точения имеет радиус округления режущей кромки ρ , определяемый качеством заточки, свойствами инструментального материала и износом резца. При этом речь может идти лишь о некотором усреднённом значении ρ вдоль режущей кромки, что важно учитывать при работе крупнозернистым твёрдосплавным инструментом. В этом случае, независимо от первоначальной заточки, величина ρ в конце периода приработки стабилизируется на уровне, характерном для зернистости данного сплава, а при работе инструментом из сверхтвёрдых материалов – увеличивается аналогично износу» [2].

Изготовители концевых фрез фирмы SHS (США) утверждают, что добиваются остроты режущих кромок на концевых твердосплавных фрезах, соизмеримых с радиусом округления $\rho \approx 1$ мкм при использовании приспособления с ручным приводом доводочным алмазным кругом зернистостью 14...10 мкм на бакелитовой связке. Однако, после первых проходов радиус ρ прирабатывается – уходит дефектный слой ($5 \div 7$ мкм) в зависимости от толщины среза a устанавливаются на уровне величины, определяемой зернистостью твёрдого сплава и его структурным (кристаллографическим) составом, а также динамическими (вибрационными) характеристиками процесса резания.

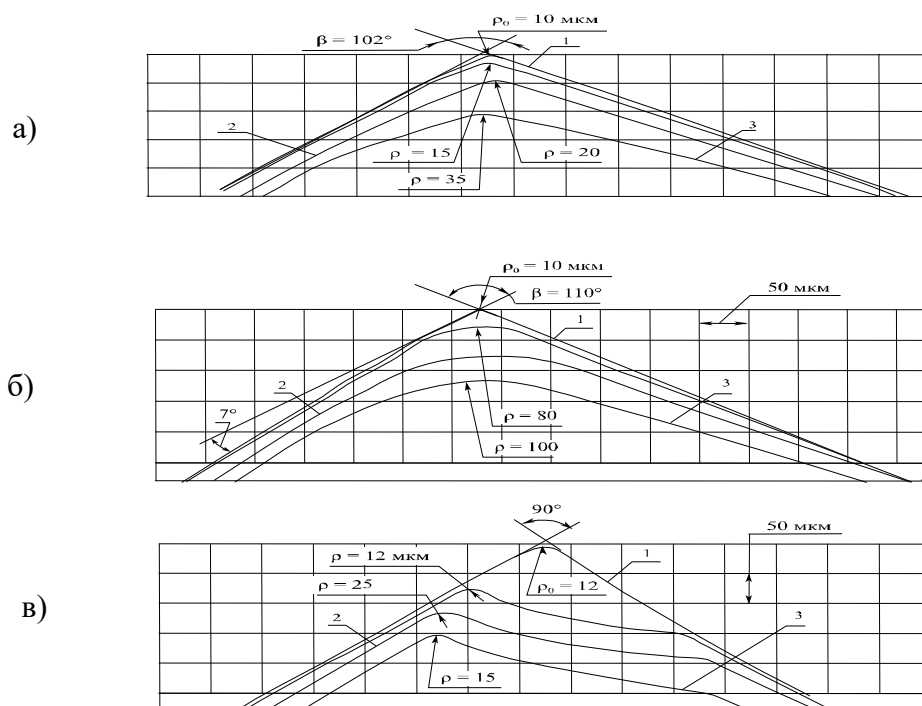


Рисунок 1. Кинетика изменения радиуса округления режущей кромки РК резца из композита 01 (Эльбора-Р) при точении закаленной стали ХВ1Г при следующих режимах: а) $t = 0,3$ мм; $S_0 = 0,15$ мм/об; б) $t = 0,7$ мм; $S_0 = 0,5$ мм/об; в) $t = 0,1$ мм; $S_0 = 0,05$ мм/об; скорость резания $V = 80 \dots 100$ м/мин.

При использовании твёрдосплавным унифицированным режущего инструментом (ТУРИ) $\rho_{\text{пр}}$ обеспечивающий наибольшую прочность РК, и радиус $\rho_{\text{т}}$, соответствующий максимальной стойкости, должны увеличиваться с ростом толщины среза a . Парные корреляционные зависимости между этими параметрами могут быть выражены эмпирическими уравнениями:

$$\rho_{\text{пр}} = 5,06 \sqrt{a};$$

$$\rho_{\text{т}} = 0,11 a,$$

где: a – действительная толщина среза, мкм.

Эти зависимости, видимо, с некоторой долей допущения могут быть применены для анализа величин $\rho_{\text{т}}$ режущей кромки РИ из СТМ при тонкой и чистовой обработке ТОМ, в том числе закалённых сталей и жаропрочных сплавов [3]. Зависимости $\rho_{\text{пр}}$ и $\rho_{\text{т}}$ от a представлены в таблице и рис. 2.

S_o , мм/об	0,01	0,02	0,04	0,05	0,06	0,08	0,1	0,1	0,3	0,6	1,0	2,0	2,5
a , мкм	7,1	14,2	28,4	35	43	57	71	107	214	428	707	1414	1767
$\rho_{\text{т}}$, мкм	0,78	1,56	3,12	3,9	4,7	6,25	7,8	11,8	23,3	46	77,8	155	194
$\rho_{\text{пр}}$, мкм	13,5	19	27	30	33	38	42	52	74	104	134	190	213
$\rho_{\text{опт}}$, мкм	1,0 – 1,4	2,0 – 2,9	4,0 – 5,7	5,0 – 7,0	6,1 – 8,6	8,1 – 11,4	10 – 14,2	15 – 21,5	30 – 40	65 – 80	90 – 100	140 – 150	165 – 175

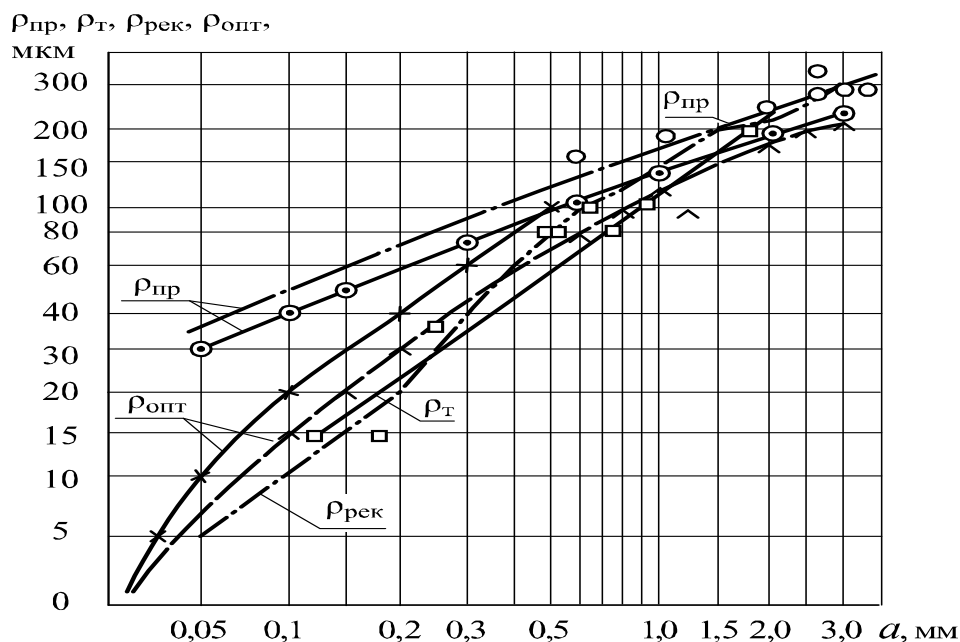


Рисунок 2 Зависимость радиусов округления режущей кромки РК от действительной толщины среза a ; $\rho_{\text{опт}}$ – оптимальный радиус округления, $\rho_{\text{рек}}$ – рекомендуемый [3].

В работе [4] утверждается, что среднее значение радиуса округления режущей кромки резца из СТМ, соответствующее наибольшей стойкости, соответствует $\rho_{\text{т}}^{\text{ср}} = 4,7 \text{ мкм} \approx 5 \text{ мкм}$. Резцовая вставка или пластина из СТМ затачивалась алмазным кругом, затем передняя и задняя поверхности доводились алмазной пастой для обеспечения $\rho = 5 \dots 6 \text{ мкм}$, так как эта величина ρ соответствует малым толщинам среза a при тонком точении резцами из СТМ. При этой величине ρ контактные напряжения распределяются в начальный период приработки (врезания) резца до $h_z = 0,01 \text{ мм}$ – не по радиусу округления режущей кромки, а отдельно по площади контакта на передней поверхности q_N , q_F и по площади фаски износа резца на задней поверхности q_{N1} , q_{F1} инструмента [5].

Силы, удельные нагрузки и средние коэффициенты трения на контактных поверхностях РИ из СТМ при тонком точении закалённых легированных сталей были исследованы в работе [6]. Здесь указывалось на влияние величины износа по задней грани h_z , которая, несомненно, связана с радиусом ρ , на силы Q и F_Q на задней поверхности РК.

На рисунке 3 приведены нормальные силы, силы трения и удельные нагрузки при точении частично приработанным ($h_z = 0,03 \text{ мм}$) резцом из композита 01 (эльбора-Р) стали ХВ1Г твёрдостью HRC_Э 59...61. Из рисунка 3 видно, что увеличение скорости резания оказывает неоднозначное влияние на силы на передней и задней поверхностях РИ: силы N и F_N (на передней поверхности) вначале убывают, а затем возрастают, а силы Q и F_Q , наоборот. С ростом подачи силы N и F_N увеличиваются, а силы Q и F_Q практически остаются постоянными, что соответствует принятой гипотезе, положенной в основу метода определения сил на режущих поверхностях инструмента [7].

Силы на задней поверхности и в особенности нормальная сила Q в условиях тонкого точения (с малой a – до $0,07 \text{ мм}$) составляют значительную величину по сравнению с N и F_N . В диапазоне скоростей резания $V = 40 \dots 70 \text{ м/мин}$ при подаче $S_0 = 0,04 \text{ мм/об}$ сила Q больше или $\approx$ равна нормальной силе N . При $S_0 = 0,08 \dots 0,16 \text{ мм/об}$ сила Q меньше силы N . Сила трения F_Q во всём исследуемом диапазоне PP меньше силы трения F_N .

Исследования и расчёты показывают, что с понижением твёрдости ОМ до HRC 45 силы N и F_N увеличиваются. Например, при точении стали X12MB твёрдостью HRC_Э45 резцом из композита 01 со скоростями $V = 70 \text{ м/мин}$ и $V = 120 \text{ м/мин}$ ($S_0 = 0,04 \text{ мм/об}$) значения сил, соответственно, составляют $N = 51 \text{ Н}$, $F_N = 41 \text{ Н}$ и $N = 82 \text{ Н}$, $F_N = 64 \text{ Н}$, в то время, как в аналогичных условиях точения той же стали с HRC_Э60 эти силы имеют меньшую величину (см. рис. 3). Такая закономерность связана, в основном, с изменением характера стружки от сливной (при HRC_Э45) к элементной (при HRC_Э60) и уменьшением в связи с этим степени пластической деформации стружки. Силы Q и F_Q на задней поверхности со снижением твёрдости стали значительно уменьшаются. Так, в процессе точения и $S_0 = 0,04 \text{ мм/об}$ силы $Q = 25 \text{ Н}$, $F_Q = 9 \text{ Н}$, а при точении этой стали твёрдостью HRC_Э60 на этих же режимах силы Q и F_Q имеют в два раза большую величину.

По мере износа резца по задней поверхности силы N и F_N при прочих равных условиях остаются почти постоянными, а силы Q и F_Q – возрастают. При точении с $V = 120 \text{ м/мин}$ стали ХВ1Г твёрдостью HRC_Э60 резцом из композита 01 ($h_z = 0,03 \text{ мм}$) $Q =$

25,5 Н и $F_Q = 6,9$ Н. Когда износ достигает величины $h_3 = 0,2$ мм, силы на задней поверхности увеличиваются до $Q = 155$ Н и $F_Q = 19,6$ Н. Аналогичная картина наблюдается и при точении стали твёрдостью HRC_э45.

Заслуживают внимания весьма высокие значения удельных нормальных и касательных напряжений на передней и задней поверхностях на начальном этапе (участке) периода стойкости (почти острым режущим клином – частично приработанным резцом).

Особенно велики эти напряжения на задней поверхности, которые в диапазоне скоростей резания $V = 40...70$ м/мин достигают величин $q_Q = 3767...4591$ МПа. Объясняется это малыми площадками действительного контакта режущего клина со стружкой и поверхностью резания в процессе тонкого точения закалённых сталей высокой твёрдости.

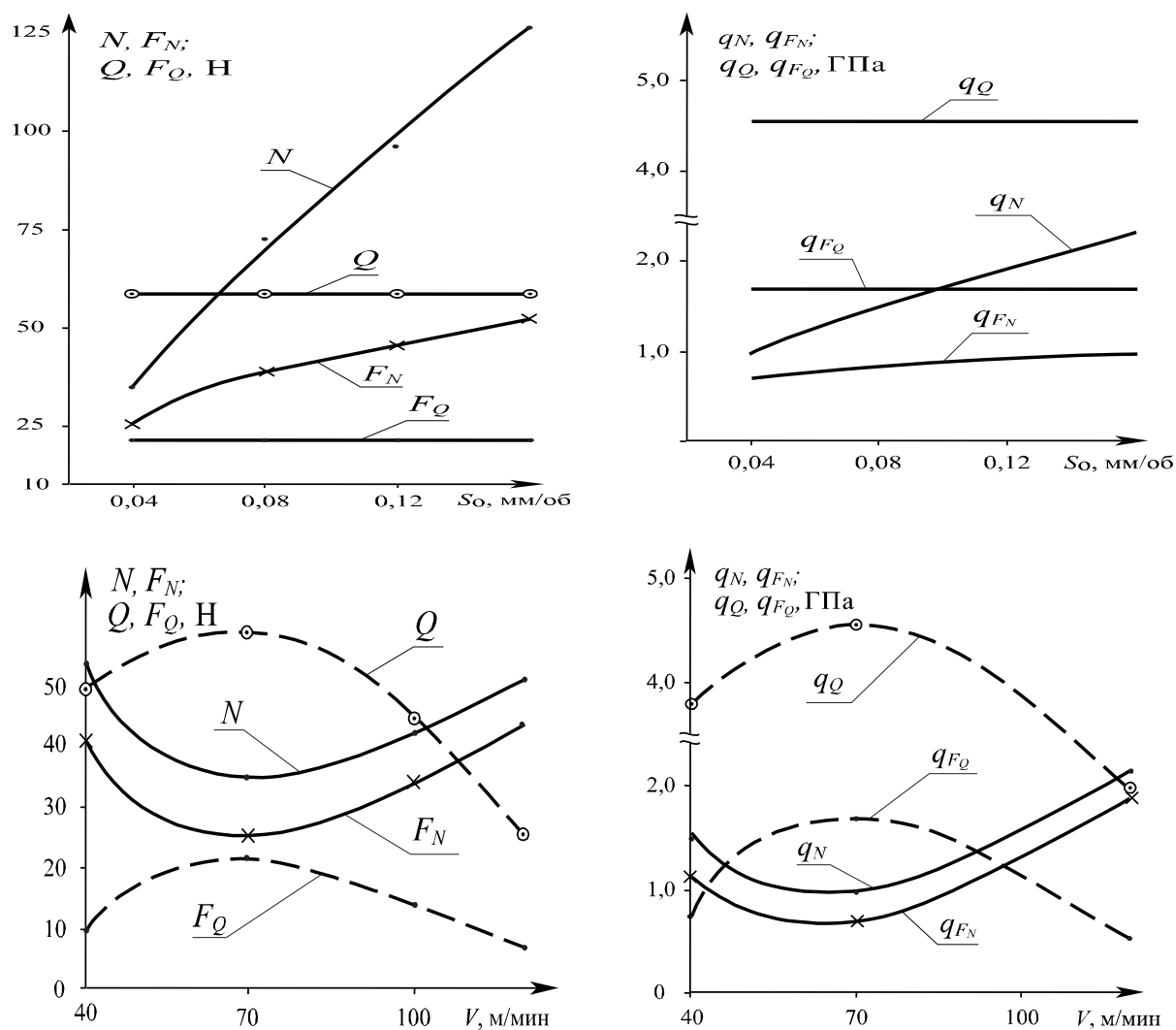


Рисунок 3. Нормальные силы, силы трения и удельные нагрузки (контактные напряжения) при точении частично приработанным ($h_3 = 0,03$ мм) резцом из композита 01 (эльбора-Р) стали ХВ1Г твёрдостью HRC_э 59...61.

Изменения нормальных и касательных напряжений с повышением скорости резания V по своему характеру аналогичны изменениям нормальных и касательных сил. Увеличение подачи S_0 способствует пропорциональному росту удельных нагрузок на передней поверхности и не изменяет их на задней поверхности [8].

Также установлено, что в зависимости от величины износа h_z напряжения q_Q и q_F могут увеличиваться или уменьшаться. При износе $h_z = 0,1$ мм они обычно возрастают по сравнению с острым резцом, а на последующих стадиях износа несколько уменьшаются.

Практика эксплуатации УРИ для наружной и внутренней обработки показала, что технология заточки и доводки РЭ не предполагает получения точно заданного радиуса округления режущих кромок, как главного параметра РК, т. к. эта технология не освоена инструментальной промышленностью во всём мире и является «ноу-хау» отдельных изготовителей прецизионного инструмента. Рекомендации по оптимальному назначению сечения среза a тонкого точения при значении ρ РЭ резцов унифицированных наружных (РУН) и расточных универсальных резцов представлены на рисунок 4. Технология заточки и доводки РЭ унифицированных резцов с использованием многоместных групповых приспособлений освоена разработчиками унифицированного инструмента и с успехом применяется на заводах прецизионного приборо- и машиностроения России [9].

при заданном сечении среза a для устойчивого резания; h_y – упругое последствие обрабатываемого материала (ОМ) после прохода РУН; ρ_T – соответствует предельно большому значению a (для чистового точения), допустимого прочностью режущего клина из твёрдого сплава; β_1 – угол условного сдвига при тонком точении различных пластичных ОМ; 1 – зона финишного тонкого точения при режимах оптимального резания (РОР); 1_m – зона финишного тонкого точения на РОР при высокой жёсткости системы ЗИПС для наружных и расточных

4. Заключение

1. Радиус округления режущей кромки ρ определяет типоразмер РК, его статическую и динамическую прочность во всем рабочем диапазоне режимов резания, особенно ρ должен четко регламентироваться для СТМ при обработке закалённых, высокопрочных и твердых сталей и сплавов.

2. По данным из различных источников для твердых сплавов и СТМ значения ρ может изменяться в широких пределах в зависимости от способа заточки и доводки РК по передней и задней поверхности, зернистости (дисперсности) структуры спеченных инструментальных материалов.

3. Резцовые вставки и неперетачиваемые пластины (СМП) из твердых сплавов и СТМ на инструментальных заводах не умеют затачивать (это «ноу-хау») специально с заданным радиусом ρ , т.е. важнейший параметр типоразмера РК в процессе изготовления не контролируется, как при первичном изготовлении РИ, так и при переточках.

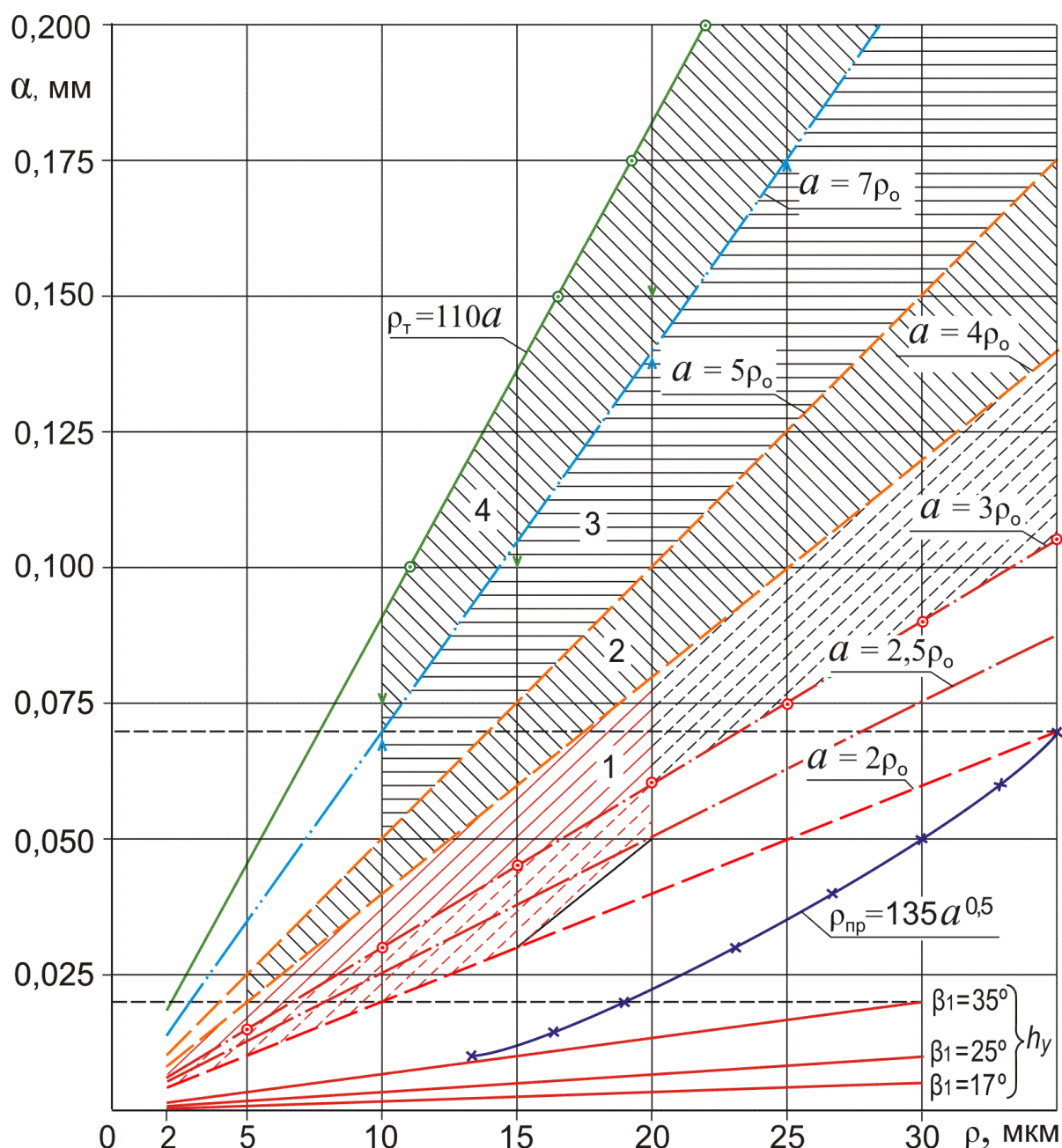


Рисунок 4. Рекомендации по оптимальному назначению сечения среза a тонкого точения при значении радиуса округления режущих кромок РЭ резцов унифицированных наружных (РУН) и расточных: ρ_{pr} - предельно малое значение ρ

4. Технология заточки и доводки РЭ унифицированных резцов с использованием компетенций на уровне «ноу-хау» и многоступенчатых групповых приспособлений освоена разработчиками унифицированного инструмента и с успехом применяется на заводах прецизионного приборо- и машиностроения России.

5. При резании указанными инструментальными материалами $\rho_{пр}$, обеспечивающий наибольшую прочность РК и радиус ρ_r , соответствующий максимальной стойкости, должен увеличиваться с ростом толщины среза.

6. В работе установлены корреляционные зависимости между $\rho_{пр}$ и ρ_r , выраженные эмпирическими уравнениями, составлена таблица этого соответствия и представлен график, отражающий эти закономерности.

7. Изучены величины нормальных сил, сил трения и удельных нагрузок (контактных напряжений) при точении частично приработанным резцом в условиях тонкого точения в диапазоне скоростей резания 30..120 м/мин и подач $S_0 = 0,02...0,16$ мм/об, что дает возможность оптимизировать процесс, как тонкой (финишной), так и предварительной обработки указанных сталей, сплавов и ТОМ.

ЛИТЕРАТУРА:

1. Режущие инструменты, оснащенные сверхтвёрдыми и керамическими материалами, и их применение: Справочник/ В. П. Жедь, Г. В. Боровских, Я. А. Музыкант, Г. М. Ипполитов. - М.: Машиностроение, 1987. – 320 с.

2. Рыкунов А. Н. Повышение эффективности тонкого точения исходя из достижимых показателей качества деталей и технологических возможностей процессов: Автореф. дисс. ... д.т.н. - М.: –МГТУ «СТАНКИН», 1999. – 30 с.

3. Хае Г.Л. Прочность режущего инструмента/ Г.Л. Хае. – М.: Машиностроение, 1975. – 168 с.

4. Белозеров В. А. Механика деформирования и разрушения при резании / В. А. Белозеров, М. Х. Утешев, А. Н. Калиев; под ред. М. Х. Утешева. – Том 2. Обработка инструментами из СТМ. – Тюмен : омГНТУ, 2012. – 128 с.

5. Ракунов Ю. П., Абрамов В. В. Регулирование стойкости резцов и качества токарной обработки деталей машин на основе синергетического влияния первичных технологических факторов. // Перспективные разработки науки и техники. Мат-лы междунар. конф. Изд-во: Sp. Z.o.o. “Nauka Istudia”(Przemysl, Польша) 15-19.11.2013.

6. Аранзон М. А. Силы, удельные нагрузки и средние коэффициенты трения на контактных поверхностях инструмента из сверхтвердых материалов при тонком точении/ М. А. Аранзон // Обработка высокопрочных сталей и сплавов инструментами из сверхтвердых синтетических материалов. – Куйбышев, 1978. – С. 27-37.

7. Ракунов Ю. П., Абрамов В. В. Аналитический метод определения сил резания при тонкой механической обработке. // Перспективные научные исследования. Мат-лы междунар. конф. Изд-во: Бял ГРАД-БГ (г. София, Болгария) 17-25.02.2014.

9. Ракунов Ю. П., Абрамов В. В. Зависимость работоспособности резцов из СТМ от геометрии и режимов резания при точении закаленных сталей // Технологии упрочнения, нанесения покрытий и ремонта: теория и практика. Мат-лы 16-й междунар. науч.-практ. конф. СПб.: Изд-во Политехн. Ун-та, 2014. В 2 ч. Ч.1. – 380 с.

10. Ракунов Ю. П., Абрамов В. В., Ракунов А. Ю. Роль скорости резания и радиуса округления режущего клина в эффективности тонкой механической обработки труднообрабатываемых материалов // Журнал «Станкоинструмент». № 1, 2 2020.– С. 66-74.

Поступила в редколлегию 14.04.2025 г.