

Машиностроение и машиноведение

УДК 621.941.1

doi: 10.18698/0536-1044-2019-3-

Обоснование стойкости и прочности резцов при точении канавок в заготовках из конструкционной стали повышенной твердости

С.В. Грубый¹, П.А. Чаевский²¹ МГТУ им. Н.Э. Баумана² ООО «Компания РИТС»

Justification of tool life and strength of the cutters when turning grooves on workpiece of construction steel with increased hardness

S.V. Grubiy, P.A. Chaevskiy

¹ Bauman Moscow State Technical University²

Машиностроительные детали могут иметь цилиндрические и торцевые канавки, для обработки которых используют составные и сборные резцы с разными геометрическими параметрами и конструктивными особенностями. Детали изготавливают из конструкционных сталей (включая закаленные), коррозионностойких сталей и сплавов и других труднообрабатываемых материалов. Повышение эффективности твердосплавных канавочных резцов является актуальной научно-технической задачей. Приведены результаты исследований по разработке методики расчета сил и температур в зоне резания, скорости изнашивания и стойкости режущего инструмента для условий точения канавок в заготовках из различных конструкционных сталей, в том числе повышенной твердости. Выполнен проверочный прочностной расчет режущего клина. Проанализировано влияние режимных и геометрических параметров инструмента на коэффициенты запаса прочности на его передней и задней поверхностях. По результатам прочностного и стойкостного анализа обоснованы выбор марки твердого сплава и предельных значений скорости резания и толщины удаляемого слоя. Выработанные рекомендации по геометрическим параметрам режущего клина и прочностным характеристикам инструментального материала являются основой для разработки конструкции сборных канавочных резцов, оснащенных сменными многогранными пластинами.

Ключевые слова: канавочный резец, прочность инструмента, стойкость инструмента, скорость резания, толщина срезаемого слоя

Machine-building parts have cylindrical and end grooves, for processing of which the compound and assembled cutters with different geometrical parameters and design features are used. Parts are made of structural steels, incl. hardened, corrosion-resistant steels and alloys, and other tough materials. Improving the efficiency of hard-alloy grooving cutters applica-

tion is an important scientific and technical challenge. An article presents the results of research on the development of methods for calculating forces, temperatures in the cutting area, wear rates and tool life for the turning conditions of grooves in the workpieces of various structural steels, incl. steels with increased hardness. The verification strength calculation of the cutting wedge is conducted and analysis of the influence of regime and geometric parameters of the tool on the safety factors on the front and rear surfaces of the tool is performed. According to the results of strength and stability analysis the choice of the hard alloy grade and limiting values of the cutting speed and the cutting layer thickness are validated. Suggested recommendations on geometrical parameters of the cutting wedge and strength characteristics of the tool material are the basis for the construction of assembled groove cutters equipped with interchangeable multi-faceted plates.

Keywords: groove cutter, tool strength, tool life, cutting speed, cutting layer thickness

Современные изделия, выпускаемые машиностроительными предприятиями, содержат большое число деталей с цилиндрическими и торцевыми канавками. Эти детали, имеющие широкий диапазон форм и размеров, изготавливают из различных конструкционных материалов. Одним из путей повышения эффективности механической обработки таких деталей является использование режущих инструментов (далее инструменты) прогрессивных конструкций.

Инструментальные фирмы Iscar, Sandvik Coromant, SimTec, Paul Horn, Carmex, WIDIA, DENTOOЛ и др. предлагают для точения канавок различные конструкции составных или сборных резцов, оснащенных сменными многогранными пластинами (СМП). Инструменты перечисленных фирм имеют разные конструктивные особенности. Вместе с тем их основным недостатком является относительно высокая стоимость, что приводит к увеличению себестоимости обработки деталей. В связи с этим разработка, изготовление и применение отечественных конструкций сборных резцов являются актуальными задачами, так как должны обеспечить снижение себестоимости продукции и издержек производства.

В качестве базового варианта рассмотрены стандартные составные канавочные резцы с напайными пластинами, геометрия которых соответствует ГОСТ 18884–73. Резцы такой конструкции имеют ряд серьезных недостатков: необходимость переточки для восстановления режущих свойств, относительно низкая стойкость между переточками, отсутствие специальной геометрии передней поверхности для обеспечения оптимального процесса стружкообразования, увеличенное вспомогательное время на смену инструмента по сравнению с

таковым для конструкций сборных инструментов с СМП и др.

ООО «Компания РИТС» занимается внедрением эффективных конструкций инструментов на современных машиностроительных предприятиях. Совместно с МГТУ им. Н.Э. Баумана проведены исследования для обоснования внедрения токарных резцов прогрессивных конструкций.

Цель работы — создание методики и расчет сил и температур в зоне резания при точении канавок в заготовках из различных конструкционных материалов (в том числе повышенной твердости), проверочный прочностной расчет режущего клина, выбор геометрии и прочностных характеристик инструментального материала и определение стойкости инструмента.

При резании труднообрабатываемых материалов, включая конструкционные стали повышенной твердости, возникают отказы канавочных резцов — поломки вследствие недостаточной прочности инструмента. В связи с этим для разработки конструкций канавочных составных и сборных резцов необходимо проанализировать силы резания и напряжения, возникающие в режущем клине инструмента, и вычислить соответствующие коэффициенты запаса прочности.

Основы современного расчета сил резания и напряжений отражены в ряде учебников, монографий и научных статей. Применительно к вопросам стружкообразования и силам резания в этих публикациях рассмотрена модель с единственной плоскостью сдвига, позволяющая количественно оценить параметры и показатели процесса. Эта модель использована и в современных отечественных и зарубежных источниках по резанию металлов, среди которых [1–7]. Эта модель экспериментально обоснована с

применением метода делительных сеток или по шлифам корней стружек [8, 9].

В работах автора, например, в [10], показана возможность распространения и уточнения модели с единственной плоскостью (поверхностью) сдвига в широком диапазоне толщин срезаемого слоя как для свободного прямоугольного резания (характерного для канавочных резцов), так и для несвободного косоугольного резания (наружного продольного точения сборными резцами с СМП). Здесь расчет параметров процесса и сил резания не требует проведения экспериментальных исследований, и основан на использовании известных механических характеристик обрабатываемого (ОМ) и инструментального материалов.

Результатами расчета являются параметры: угол сдвига, коэффициент укорочения стружки, относительный сдвиг, коэффициент трения на передней (ПП) и задней поверхностях (ЗП) инструмента, составляющие силы резания на его контактных площадках и др. Знание сил и размеров контактных площадок позволяет определить средние температуры в условной плоскости сдвига, на ПП и ЗП инструмента по методике А.Н. Резникова.

Отличительной особенностью предложенной методики является расчет скорости изнашивания и износа по ЗП инструмента. Проводя аналогию с моделью изнашивания А.С. Проникова, отражающую в качестве основных факторов контактное давление, скорость трения и твердость изнашиваемого материала, предложено использовать связь скорости изнашивания ЗП инструмента с обобщенным параметром, характеризующим процесс резания. В качестве обобщенного параметра принято отношение $x = v/(HV)$, где v — скорость резания (трения), м/с; HV — твердость (по Виккерсу) изнашиваемой поверхности как функция температуры резания, МПа.

Для современных марок инструментальных твердых сплавов (ТС) установлена связь скорости изнашивания I_{nt} и обобщенного параметра в виде степенного уравнения

$$I_{nt} = C(v/HV)^n, \quad (1)$$

где C — постоянная; n — показатель степени; значения C и n для различных групп ОМ — сталей (в том числе закаленных) и сплавов — приведены в монографии [10].

Для расчета периода резания принята аппроксимация кривой износа в виде

$$h_{zi} = h_{zn} + \sum_{i=1}^n i\Delta_h, \quad h_{zn} < h_{zi} \leq h_{zmax}, \quad (2)$$

где h_{zi} , h_{zn} и h_{zmax} — текущее (i -е), начальное и допустимое значение износа соответственно; Δ_h — дискретное значение по износу, определяющее число расчетных точек на кривой износа.

Соответствующий период резания вычисляли как сумму приращений времени, соответствующих увеличению износа на величину Δ_h :

$$T = \sum_{i=1}^n \Delta_h / I_{nt,i}. \quad (3)$$

Здесь скорость изнашивания рассчитана по выражению (1).

Исходными данными для расчетной методики являются:

- режимные параметры, допустимое значение износа и геометрические параметры инструмента;
- механические и физические характеристики ТС и ОМ, среди которых $HV = f(T_p)$ — твердость поверхности ТС как функция температуры T_p , МПа; $E = f(T_p)$ — модуль упругости ТС как функция температуры, ГПа; μ_2 — коэффициент Пуассона ТС; $HV = f(T_p)$ или $\sigma_b = f(T_p)$ — твердость или прочность ОМ как функция температуры, МПа; $E_1 = f(T_p)$ — модуль упругости ОМ как функция температуры, ГПа; μ_1 — коэффициент Пуассона ОМ;
- теплофизические характеристики ТС и ОМ.

Расчетные параметры: длина l_1 , площадь контакта стружки и силы по ПП инструмента, угол сдвига, угол действия, коэффициент укорочения (усадка) стружки, сила стружкообразования, максимальное и среднее значения контактного давления на режущей кромке, касательная и нормальные силы на ЗП инструмента, интенсивности теплового потока в плоскости сдвига на ПП и ЗП инструмента; температуры деформации T_d , на ПП T_1 и ЗП T_2 , °С; скорость изнашивания I_{nt} , мм/мин, определяемая по выражению (1); текущее значение износа h_{zi} , мм, вычисляемое по формуле (2); стойкость (период резания) T до допустимого значения износа, мин, рассчитываемая по выражению (3).

Анализ механизма разрушения инструментальных материалов показывает, что в соответствии с принципами механики сплошной среды состояние материала в точке разрушения полностью зависит от уровня действующих напря-

жений. Наступление предельного состояния определяется механизмом возникновения трещин, тесно связанным с касательными напряжениями, а распространение трещин обусловлено нормальными растягивающими напряжениями. Поэтому общий критерий прочности инструментального материала должен быть таким, чтобы учитывалось действие обоих механизмов разрушения.

Для оценки предельного состояния хрупкого материала твердосплавного резца рассмотрен критерий предельного состояния, предложенный Г.С. Писаренко и А.А. Лебедевым, который состоит из двух слагаемых. Первое, определяемое значением пластической деформации, характеризует условие зарождения трещины, а второе — ее развитие и распространение [11]:

$$\sigma_{\text{экр}} = \chi\sigma_i + (1-\chi)\sigma_1 A^{1-J} \leq \sigma_b, \quad (4)$$

где $\sigma_{\text{экр}}$ — эквивалентное напряжение; χ — параметр, определяющий долю сдвиговой деформации в разрушении, $\chi = \sigma_b / \sigma_{-b}$ (σ_b и σ_{-b} — пределы прочности на растяжение и сжатие ТС); σ_i — интенсивность напряжения; A — константа, определяющая статистическую природу процесса разрушения и зависящая от характера имеющихся в материале дефектов; J — параметр, характеризующий «жесткость» нагружения, $J = (\sigma_1 + \sigma_2 + \sigma_3) / \sigma_i$ ($\sigma_1, \sigma_2, \sigma_3$ — главные напряжения, $\sigma_1 > \sigma_2 > \sigma_3$).

Расчет прочности режущей части инструмента выполнен по допускаемым напряжениям первого рода. Аналитически рассчитаны радиальные напряжения на границах режущего клина от действия двух сосредоточенных сил:

- на ПП

$$F = (P_n^2 + F_1^2)^{0,5};$$

- на ЗП

$$F_z = (N_2^2 + F_2^2)^{0,5},$$

где P_n и F_1 — нормальная и касательная составляющие силы F ; N_2 и F_2 — нормальная и касательная составляющие силы F_z .

Сила F приложена на расстоянии $r_0 = l_1/3$ от вершины инструмента (l_1 — длина контакта стружки с ПП), а сила F_z — на расстоянии $r_{0z} = h_z/3$ (h_z — износ по ЗП). Средний коэффициент трения на ПП $\mu = F_1/P_n$, на ЗП инструмента $f_{tr} = F_2/N_2$.

Расчет радиальных напряжений выполнен по формулам М.П. Вадачкория, приведенным в работе [12]. Например, напряжения на грани-

цах режущего клина при нагружении только по ПП определяются по формуле

$$\sigma_r = -\frac{2F}{r_0 b \beta} \xi^{1-\beta/\pi} q(\pm\xi),$$

где b — ширина срезаемого слоя, равная ширине канавки; β — угол клина; ξ — безразмерный параметр, $\xi = (r/r_0)^{\pi/\beta}$ (r — полярный радиус); q — параметр, зависящий от геометрии клина и угла действия силы (коэффициента трения).

Напряжения на границах клина от действия силы на ЗП вычисляли по аналогичной формуле.

В качестве расчетных приняты две точки на ПП и ЗП, расположенные в полярной системе координат на радиусе $r = l_1$ от вершины инструмента (граница контакта).

С учетом того, что на ПП клина за пределами контактной зоны главные напряжения σ_2 и σ_3 равны нулю, условие прочности (4) примет вид $\sigma_1 \leq \sigma_b$, а соответствующий коэффициент запаса будет равен отношению предела прочности на растяжение ТС к суммарному радиальному напряжению от действия силы на ПП F и ЗП клина F_z : $k_{rp} = \sigma_b / \sigma_{rp}(F, F_z)$.

На ЗП инструмента главные напряжения σ_1 и σ_2 равны нулю, поэтому условие прочности (4) примет вид $|\sigma_3| \leq \sigma_{-b}$, а соответствующий коэффициент запаса будет равен отношению предела прочности на сжатие ТС к суммарному радиальному напряжению от действия силы на ПП F и ЗП клина F_z : $k_{rz} = \sigma_{-b} / |\sigma_{rz}(F, F_z)|$.

В расчетах приняты следующие исходные данные и значения параметров:

- ширина канавки $b = 2$ мм, обрабатываемой на наружной цилиндрической поверхности заготовки;

- материал режущей части резца — стандартные ТС марок ВК8, ВК6М, Т15К6 и типовой представитель двухкарбидных мелкозернистых ТС по классификации ИСО с условным обозначением Р10М;

- геометрические параметры инструмента — задний угол 8° , передний угол 10° ;

- ОМ — закаленная сталь марки 40Х (твердостью HRC 50), а также выбранные для сравнения две стандартные марки стали — конструкционной 45 ($\sigma_b = 600$ МПа) и коррозионностойкой 12Х18Н10Т.

Механические характеристики ТС (см. таблицу), использованные в расчетах, заимствова-

Механические характеристики ТС

ТС	σ_b , МПа	σ_{-b} , МПа	E , ГПа
ВК8	900	3200	610
ВК6М	730	3200	640
Т15К6	650	3500	525
Р10М	900	4800	510

ны из литературных источников, в том числе из [13].

Разупрочнение ТС и ОМ, а также изменение модулей упругости под действием температуры учтено с помощью формул, приведенных в работе [10].

Например, для ТС марки ВК8 функция твердости от температуры резания, °С, представлена выражением $HV = 12976,9 - 9,22T_p$, МПа, а для ТС марки Р10М — $HV = 17500 - 10T_p$. Падение твердости закаленной стали марки 40Х (HRC 50) учтено как $HV = 5265 - 3,83T_p$, МПа.

Анализ обобщенных результатов исследования прочности режущего клина путем вычислительного эксперимента показал, что коэффициенты запаса прочности повышаются с ростом коэффициентов трения по контактным площадкам инструмента, с уменьшением его переднего и заднего углов и с увеличением длины контакта стружки с ПП. Вместе с тем изменение этих параметров происходит с одновременным изменением значений сил резания, которые также оказывают непосредственное влияние на коэффициенты запаса прочности, что необходимо учитывать для реальных условий резания.

Результаты расчетов приведены в виде графиков. На рис. 1 показаны кривые износа — зависимости износа по ЗП резца из ТС марки

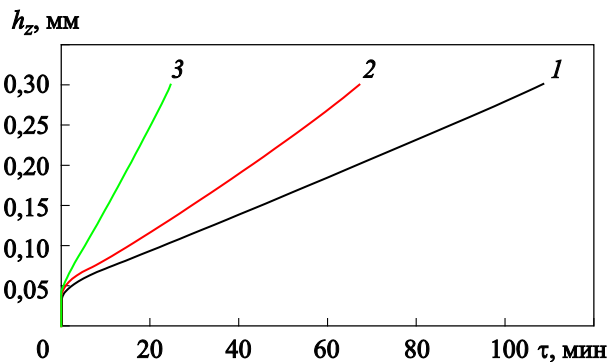


Рис. 1. Зависимости износа по ЗП резца из ТС марки ВК8 h_z от времени обработки пазов τ в заготовках из различных марок сталей при $v = 80$ м/мин, $a = 0,2$ мм и $b = 2$ мм: 1 — сталь 45; 2 — 12Х18Н10Т; 3 — 40Х (HRC 50)

ВК8 от времени обработки заготовок из различных конструкционных сталей при скорости резания $v = 80$ м/мин, толщине $a = 0,2$ мм и ширине срезаемого слоя $b = 2$ мм.

Зависимости стойкости и коэффициента запаса прочности резца из ТС марки ВК8 от скорости резания приведены на рис. 2, а и б соответственно. Можно отметить, что стойкость и прочность резцов из ТС марки ВК8 значительно снижается при обработке пазов в заготовках из закаленной конструкционной стали. Однако стойкость инструмента можно увеличить, применяя ТС марки Т15К6 и мелкозернистый ТС группы Р10.

Зависимости стойкости резцов из различных марок ТС, от скорости резания при обработке пазов в заготовках из закаленной стали 40Х (HRC 50) показаны на рис. 3, а. Установлено, что у резцов из Т15К6 и Р10М стойкость существенно выше, чем у таковых из ВК8 и ВК6М. Вместе с тем, если за допустимое значение ко-

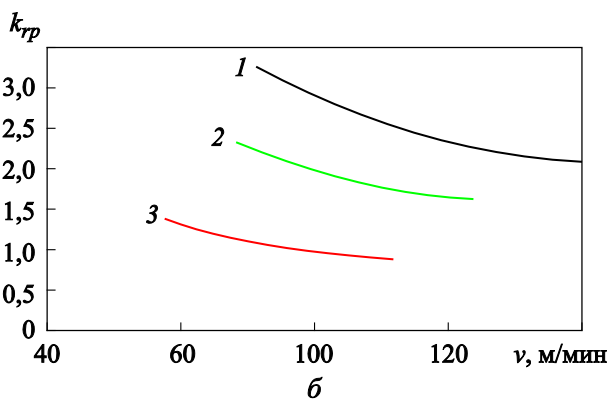
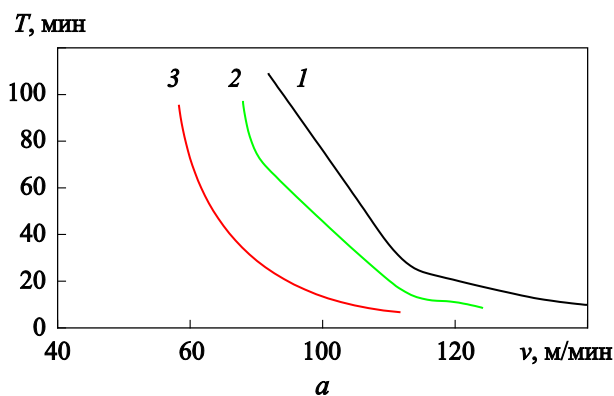


Рис. 2. Зависимости стойкости T (а) и коэффициента запаса прочности на ПП k_{rp} (б) резца из ТС марки ВК8 от скорости резания v при обработке пазов в заготовках из различных марок сталей:

1–3 — то же, что на рис. 1

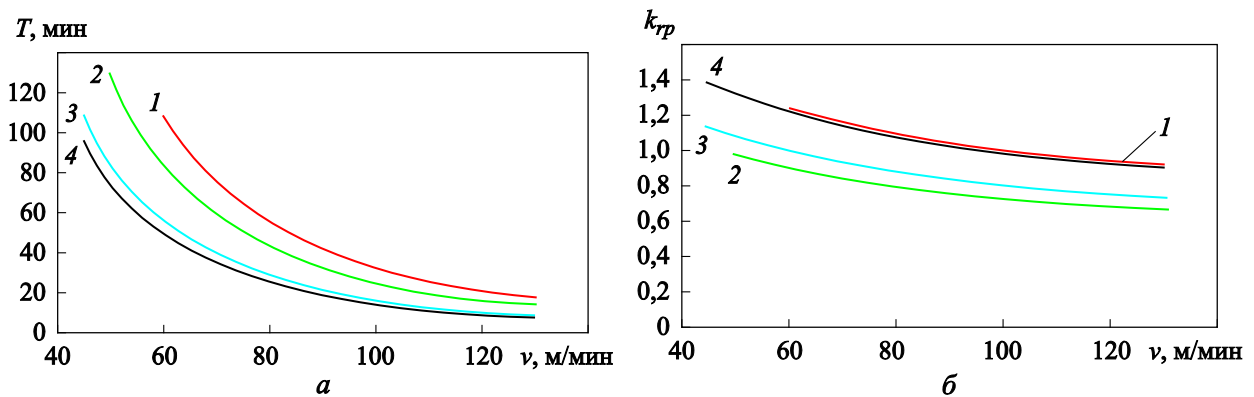


Рис. 3. Зависимости стойкости T (а) и коэффициента запаса прочности на ПП k_{tr} (б) резцов из различных марок ТС от скорости резания v при обработке пазов в заготовках из закаленной стали 40X (HRC 50): 1 — P10M; 2 — T15K6; 3 — BK6M; 4 — BK8

эфициента запаса прочности на ПП принять $k_{tr} = 1,2$, то можно применять только резцы из ТС марок BK8 и P10M при скорости резания $v \leq 60$ м/мин. Это следует из графиков, показанных на рис. 3, б. Для всех марок ТС коэффициент запаса прочности на ЗП $k_{rz} > 1,2$.

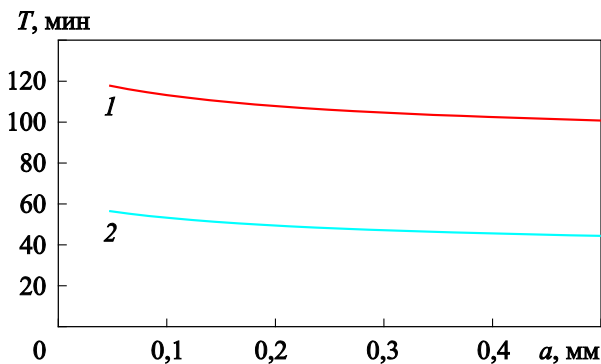


Рис. 4. Зависимости стойкости T резцов из двух марок ТС от толщины срезаемого слоя a при обработке пазов в заготовках из закаленной стали со скоростью резания $v = 60$ м/мин: 1 — P10M; 2 — BK8

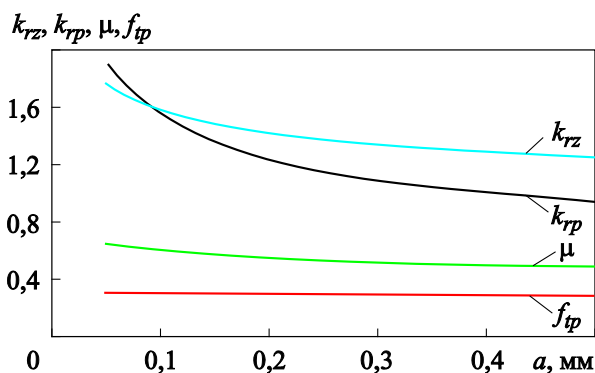


Рис. 5. Зависимости коэффициентов запаса прочности k_{tr} , k_{rz} и трения μ , f_{tr} от толщины срезаемого слоя a при обработке пазов в заготовках из закаленной стали со скоростью резания $v = 60$ м/мин

Помимо скорости резания режимным параметром является толщина срезаемого слоя (подача). Ее влияние на стойкость прорезных резцов из двух марок ТС при обработке пазов в заготовках из закаленной стали со скоростью резания $v = 60$ м/мин показано на рис. 4.

Зависимости коэффициентов запаса прочности на ПП k_{tr} и ЗП k_{rz} клина инструмента и коэффициентов трения на ПП μ и ЗП f_{tr} от толщины срезаемого слоя приведены на рис. 5. Здесь сохраняется отмеченная ранее тенденция к повышению коэффициентов запаса прочности с увеличением коэффициентов трения.

Коэффициент запаса прочности на ПП инструмента больше значения 1,2 для толщин срезаемого слоя $a \leq 0,2$ мм.

С учетом результатов исследований, проведенных специалистами ООО «Компания РИТС», спроектирована линейка токарных канавочных резцов. Модель базовой конструкции канавочного сборного резца показана на рис. 6.

Разработанная конструкция имеет следующие основные особенности:

- режущие пластины изготавливают из заготовки стандартной треугольной формы СМП;



Рис. 6. Модель базовой конструкции канавочного сборного резца с СМП

- предусмотрена возможность изготовления СМП с заданной шириной режущего клина, а также фасонного профиля;
- на одну державку могут быть установлены СМП для обработки канавок различных профилей;
- предусмотрено крепление СМП на державке повышенной жесткости и надежности;
- выбрана марка мелкозернистого ТС отечественного производства повышенной прочности с учетом проведенного прочностного анализа.

Выводы

1. Разработанная и реализованная в виде программного алгоритма расчетная методика позволяет выполнить анализ таких показателей токарной обработки как силы, температура резания, скорость изнашивания, износ и стойкость инструмента, определить размеры кон-

тактных площадок и выполнить проверочный прочностной расчет режущего клина инструмента.

2. При обработке пазов в заготовках из закаленной стали наибольшую стойкость имеют резцы из ТС марок T15K6 и P10M. По условию прочности рекомендовано использовать резцы из BK8 и P10M со скоростью резания не более 60 м/мин и с толщиной срезаемого слоя не более 0,2 мм.

3. Диапазон режимных параметров по скорости резания и толщине срезаемого слоя можно расширить применением новых марок ТС с пределом прочности на растяжение $\sigma_b > 900$ МПа.

4. Разработана конструкция сборного канавочного резца, оснащенного режущей пластиной, изготовленной из СМП стандартной формы. Выбран твердый сплав отечественного производства повышенной износостойкости и прочности.

Литература

- [1] Розенберг Ю.А. *Резание материалов*. Курган, Зауралье, 2007. 294 с.
- [2] Klocke F. *Manufacturing Processes 1. Cutting*. Berlin Heidelberg, RWTH edition, Springer-Verlag, 2011. 504 p.
- [3] Trent E.M., Wright P.K. *Metal cutting*. Boston, Butterworth-Heinemann, 2000. 446 p.
- [4] Stahl J.-E., Andersson M., Bushlya V., Zhou J., Andersson C. *Metal cutting: theories and models*. Lund, Sweden, 2012. 580 p.
- [5] Старков В.К. *Физика и оптимизация резания материалов*. Москва, Машиностроение, 2009. 640 с.
- [6] Petrushin S.I., Proskokov A.V. Theory of Constrained Cutting: Chip Formation with a Developed Plastic Deformation Zone. *Russian Engineering Research*, 2010, vol. 30, no. 1, pp. 45–50, doi: 10.3103/S1068798X10010119
- [7] Ярославцев В.М. Механика процесса резания пластически деформированных металлов с неоднородными свойствами по толщине срезаемого слоя. *Наука и образование. МГТУ им. Н.Э. Баумана*, 2011, № 8, doi: 10.7463/0811.0195350. URL: <http://engineering-science.ru/doc/195350.html> (дата обращения 28 ноября 2018).
- [8] Toenshoff H.K., Denkena B. *Basics of Cutting and Abrasive Processes*. Berlin Heidelberg, Springer-Verlag, 2013, doi: 10.1007/978-3-642-33257-9
- [9] Ravi Shankar M., Verma R., Rao B.C., Chandrasekar S., Compton W.D., King A.H., Trumble K.P. Severe Plastic Deformation of Difficult-to-Deform Materials at Near-Ambient Temperatures. *Metallurgical and Materials Transactions A: Physical Metallurgy and Materials Science*, 2007, vol. 38A, iss. 9, pp. 1899–1905, doi: 10.1007/s11661-007-9257-8
- [10] Грубый С.В. *Оптимизация процесса механической обработки и управление режимными параметрами*. Москва, Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2014. 149 с.
- [11] Остафьев В.А. *Расчет динамической прочности режущего инструмента*. Москва, Машиностроение, 1979. 168 с.
- [12] Лоладзе Т.Н. *Прочность и износостойкость режущего инструмента*. Москва, Машиностроение, 1982. 320 с.
- [13] De Vos P., Stahl J.-E. *Metal cutting. Theories in Practice*. Seco Tools AB, Lund-Fagersta, Sweden, 2014. 183 p.

References

- [1] Rozenberg Yu.A. *Rezaniye materialov* [Cutting materials]. Kurgan, Zaural'ye publ., 2007. 294 p.
- [2] Klocke F. *Manufacturing Processes 1. Cutting*. Berlin Heidelberg, RWTH edition, Springer-Verlag, 2011. 504 p, doi: 10.1007/978-3-642-11979-8_1
- [3] Trent E.M., Wright P.K. *Metal cutting*. Boston, Butterworth–Heinemann, 2000. 446 p.
- [4] Stahl J.-E., Andersson M., Bushlya V., Zhou J., Andersson C. *Metal cutting: theories and models*. Lund, Sweden, 2012. 580 p.
- [5] Starkov V.K. *Fizika i optimizatsiya rezaniya materialov* [Physics and optimization of cutting materials]. Moscow, Mashinostroyeniye publ., 2009. 640 p.
- [6] Petrushin S.I., Proskokov A.V. Theory of Constrained Cutting: Chip Formation with a Developed Plastic Deformation Zone. *Russian Engineering Research*, 2010, vol. 30, no. 1, pp. 45–50, doi: 10.3103/S1068798X10010119
- [7] Yaroslavtsev V.M. Mechanics of cutting processes of plastically deformed metals with non-uniform properties of cutting layer. *Science and Education of Bauman MSTU*, 2011, no. 8, doi: 10.7463/0811.0195350. Available at: <http://engineering-science.ru/doc/195350.html> (accessed 28 November 2018).
- [8] Toenshoff H.K., Denkena B. *Basics of Cutting and Abrasive Processes*. Berlin Heidelberg, Springer-Verlag, 2013, doi: 10.1007/978-3-642-33257-9
- [9] Ravi Shankar M., Verma R., Rao B.C., Chandrasekar S., Compton W.D., King A.H., Trumble K.P. Severe Plastic Deformation of Difficult-to-Deform Materials at Near-Ambient Temperatures. *Metallurgical and Materials Transactions A: Physical Metallurgy and Materials Science*, 2007, vol. 38A, iss. 9, pp. 1899–1905, doi: 10.1007/s11661-007-9257-8
- [10] Grubyy S.V. *Optimizatsiya protsessa mekhanicheskoy obrabotki i upravleniye rezhimnymi parametrami* [Optimization of the machining process and control of regime parameters]. Moscow, Bauman Press, 2014. 149 p.
- [11] Ostaf'yev V.A. *Raschet dinamicheskoy prochnosti rezhushchego instrumenta* [Calculation of the dynamic strength of the cutting tool]. Moscow, Mashinostroyeniye publ., 1979. 168 p.
- [12] Loladze T.N. *Prochnost' i iznosostoykost' rezhushchego instrumenta* [Durability and wear resistance of the cutting tool]. Moscow, Mashinostroyeniye publ., 1982. 320 p.
- [13] De Vos P., Stahl J.-E. *Metal cutting. Theories in Practice*. Seco Tools AB, Lund–Fagersta, Sweden, 2014. 183 p.

Статья поступила в редакцию 22.01.2019

Информация об авторах

ГРУБЫЙ Сергей Витальевич — доктор технических наук, заведующий кафедрой «Инструментальная техника и технологии». МГТУ им. Н.Э. Баумана (105005, Москва, Российская Федерация, 2-я Бауманская ул., д. 5, стр. 1, e-mail: grusv_16@bmstu.ru).

ЧАЕВСКИЙ Павел Алексеевич — ведущий инженер. ООО «Компания РИТС» (107023, Москва, ул. Семеновская Б., д. 40, стр. 18, офис 106, e-mail: Pchaevskiy@mail.ru).

Просьба ссылаться на эту статью следующим образом:

Грубый С.В., Чаевский П.А. Обоснование стойкости и прочности резцов при точении канавок в заготовках из конструкционной стали повышенной твердости. *Известия высших учебных заведений. Машиностроение*, 2019, № 3, с. , doi: 10.18698/0536-1044-2019-3-

Please cite this article in English as:

. *Proceedings of Higher Educational Institutions. Machine Building*, 2019, no. 3, pp. , doi: 10.18698/0536-1044-2019-3-