# ОСОБЕННОСТИ ИНСТРУМЕНТАЛЬНОГО ОБЕСПЕЧЕНИЯ ПРОЦЕССОВ ТОЧЕНИЯ ПОВЕРХНОСТЕЙ СЛОЖНОГО ПРОФИЛЯ

DOI: 10.18572/2686-8598-2019-1-1-20-30

#### Кудряшов Е.А., Смирнов И.М

AO «Научно-исследовательский инженерный институт», 143912, Россия, Московская область, Балашиха, шоссе Энтузиастов, 6 kea-swsu@mail.ru. +7(495)524-90-97: pochta@aoniii.ru. +7(495)524-91-33

Рассмотрены технологические проблемы, связанные с точением сменными многогранными пластинами деталей сложного профиля, образованных сочетанием базовых поверхностей вращения с элементами их разрыва – разного рода второстепенными пазами, отверстиями, выточками, выемками и т.п., создающими в ходе резания сложности достижения заданной точности и качества. Аналитическими и экспериментальными методами установлены возникающие в ходе точения прерывистых поверхностей зависимости между парой резания режущий элемент – обрабатываемая поверхность заготовки, а также конструктивными особенностями применяемых инструментов. Показаны возможные пути совершенствования инструментального обеспечения процессов точения поверхностей сложного профиля, касающиеся сохранения длительной прочности и ресурса режущего элемента на протяжении периода резания партии заготовок, с одной стороны, и необходимостью получения заданного качества производимых изделий, с другой.

**Ключевые слова:** инструментальный материал, передняя поверхность инструмента, работоспособность, поверхность сложного профиля, прерывистое точение.

# CUTTING TOOL EQUIPMENT OF TURNING SURFACES OF A COMPLEX PROFILE

Kudryashov E.A., Smirnov I.M. JS «Scientific Research Engineering Institute», 143912, Russia, Moscow region, Balashikha, shosse Entuziasyov, 6 kea-swsu@mail.ru

The article shows the technological problems associated with turning by the indexable inserts parts with a complex profile, formed by a combination of rotational surfaces with the elements of the rupture – various grooves, holes, slots, recesses, etc., when cutting with difficulty creating the accuracy and quality. In the course of turning discontinuous surfaces, the relationship between the cutting element and the workpiece surface is established, as well as the design features of the tools used. The article shows the ways to improve the tool equipment of turning surfaces of a complex profile concerning the preservation of the tool life during the period of cutting parts on the one hand and the need to obtain a quality of the products produced on the other hand.

**Keywords:** cutting tool material, rake surface, efficiency, the surface of the complex profile, intermittent turning.

## ВВЕДЕНИЕ

Технический уровень современного инструментального обеспечения определяется наличием надежной конструкции инструмента, способной предоставить комфортные условия обработки поверхностей заготовки различной конструктивной сложности, содержащих как отдельные элементы разрыва, так и более сложные сочетания, образованные отверстиями, пазами, местными углублениями, выемками, стыками и чередованиями участков различной твердости разной формы, размеров и расположения, являющимися поверхностями прерывистого резания, что предопределяет особые подходы к металлообработке (Andreev et. al., 2010; Carou et. al., 2014; Hassan et. al., 2016).

В ходе точения поверхности с элементом разрыва резец последовательно совершает врезание, резание, выход из контакта, холостой пробег через участок разрыва и новое врезание в заготовку. Подобная последовательность сопровождается вибрациями, а также циклическими изменениями механических и температурных нагрузок на режущий элемент, величина, частота и продолжительность которых определяются формой, размерами и расположением элементов разрыва на обрабатываемой поверхности заготовки (Altintas, 2012; Pavlov, 2017).

Согласно техническим условиям, чистовое (а в отдельных случаях, тонкое) точение обеспечивает точность наружных цилиндрических поверхностей в пределах 6-8 квалитетов при параметре шероховатости Ra 0,32-1,25 мкм. Примерно такие показатели обеспечивает абразивный метод отделочной обработки – круглое шлифование (Grzesik et. al., 2014; Legutko et. al., 2017).

В связи с прерывистым характером точения, из-за высокой хрупкости инструментальных материалов, резец не в состоянии сохранять длительное время заданную работоспособность. Поэтому уже в период приработки часто происходит интенсивное выкрашивание режущих кромок и разрушение хрупкой вершины режущего элемента, что изначально, при проектировании технологии изготовления детали, является основанием изменения соотношения отдельных видов обработки: уменьшается объем токарной обработки за счет увеличения доли абразивной (Bushlya et. al., 2014; De Vos, 2016).

Наличие существующей тенденции объясняется двумя признаками – низкой стойкостью инструментальных материалов при лезвийной обработке поверхностей заготовок сложного профиля, а также разным уровнем оборудования для точения и шлифования, поскольку токарные станки уступают точности, достигаемой на шлифовальных станках (Grzesik et. al., 2017).

Вместе с тем, позитивный прогноз увеличения скорости резания при внедрении лезвийной обработки искусственными сверхтвердыми материалами (композиты) дает реальную возможность вытеснить абразивную обработку (Ко and Kim, 2001; Kudryashov et. al., 2018). Кроме того, точение обладает следующими основными преимуществами перед шлифованием:

- 1) улучшенные характеристики качества обработанной поверхности, в том числе:
- отсутствие прижогов;
- отсутствие шаржирования (насыщение частицами инструментального материала обработанной поверхности);
- возможность придания микропрофилю обработанной поверхности регулярного характера, способного удержать масляный слой для создания комфортных условий парам трения (вал-втулка);
- 2) простота технологической наладки, в том числе:
- возможность применения стандартного проходного резца с комплектом сменных многогранных пластин, расширяющих его технологические возможности;

- сокращение вспомогательного времени на профилирование шлифовального круга и наладку станка;
- 3) снижение производственных затрат, в том числе:
- существенно меньшие затраты основного времени;
- меньшая стоимость токарного оборудования;
- возможность выполнения токарных работ менее квалифицированными станочниками.

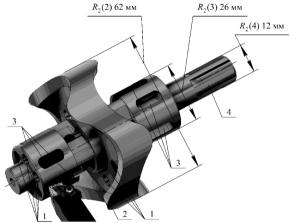
Ожидаемые преимущества оправдывают затраты на поиск оптимальных решений, направленных на внедрение лезвийной обработки прерывистых поверхностей за счет совершенствования конструкции и разработки новых приемов, обеспечивающих сохранение работоспособности инструменту (Żak, 2017).

### МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

На примере точения поверхности сложного профиля детали Ротор (рис. 1) рассмотрим способ сохранения стойкости инструментального материала созданием особых условий для безударного резания прерывистых поверхностей.

На обрабатываемых поверхностях детали имеются несколько групп отверстий и пазов различных размеров, конфигурации и расположения (см. поз. 1 и 3, рис. 1), а также спиральная поверхность (поз. 2, рис. 1) и шлицевая поверхность (поз. 4, рис. 1). Существует высокая вероятность разрушения хрупкой вершины режущего элемента при врезании в любую поверхность с элементами разрыва. Кроме этого, проведение экспериментальных исследований с использованием реальных деталей связано со значительными затратами материальных средств и временем на их подготовку и осуществление (Grubyi and Lapshin, 2012; Li et. al., 2017). Поэтому анализ работоспособности режущего элемента проводился моделированием условий точения прототипа детали Ротор с последующим сопоставлением полученных результатов с выборочными экспериментальными данными для принятия объективных конструктивных решений, касающихся в равной степени как инструмента, так и детали (см. рис. 1).

Обрабатываемая поверхность прототипа конструктивно повторяет сложность детали Ротор. Она состоит из четырех участков равной длины, в том числе: первый участок гладкий, а все три последующие, имитирующие прерывистые поверхности детали с элементами разрыва (см. поз. 2, 3 и 4, рис. 1), имеют общий конструктивный элемент – продольный паз, площадь которого на каждом последующем участке возрастает на 20 % за счет увеличения его ширины от общей площади обрабатываемой поверхности.



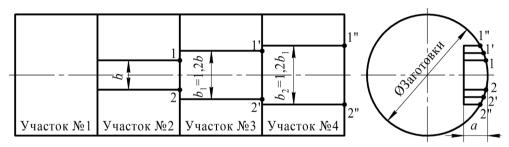
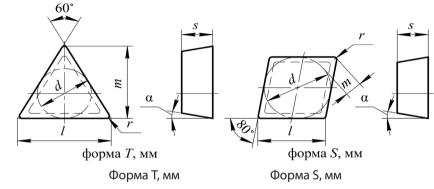


Рис. 1. Деталь Ротор (a) и ее прототип (б): 1-4 – элементы разрыва обрабатываемых поверхностей

Учитывая высокую конструктивную сложность обрабатываемых поверхностей, необходимо иметь конструкцию сменной многогранной пластины проходного резца, способную с заданной производительностью в условиях прерывистого точения обеспечить заданные показатели точности и качества (Loladze, 1982; Özel, 2003).

На рис. 2 показаны типовые конструкции пластин, применяемые для точения поверхностей сложного профиля.



Обозначение пластин	d	I	S		~ 0	r	m
			1-й ряд	2 -й ряд	a, °	'	m
TPGN -11T308 6	,35	11,0	4,76 3	,18	11 0	,8 8,	,725
CPGN -120408	12,7	12,8	4,76	-	11 0	,8 3	,088

Экспериментальное исследование работоспособности режущего элемента сменной многогранной пластины при точении поверхностей сложного профиля осложнено рядом причин:

- трудностью исследования нагружения и разгрузки режущего элемента при врезании и выходе из контакта с обрабатываемой прерывистой поверхностью заго-
- неопределенностью условий точения поверхности сложного профиля при многовариантном расположении на ней элементов разрыва.

Отсутствие государственных и отраслевых нормативных документов, регламентирующих проектные расчеты прочности и ресурса сменных многогранных пластин проходных резцов, не позволяет получить достоверные оценки принимаемых решений и обеспечить требуемые значения работоспособности режущего элемента. В силу многофакторности рассматриваемых процессов и конструкций, при фактической неопределенности форм, размеров и расположения на обрабатываемой поверхности

детали элементов разрыва, нет возможности для использования известных в металлообработке линейных и плоских рабочих схем (Ventura et. al., 2015).

Вместе с тем практический интерес к современному состоянию моделирования условий взаимодействия режущего элемента сменной многогранной пластины с поверхностью заготовки сложного профиля обусловлен тем, что модели, с одной стороны, отражают уровень знаний о физико-механических процессах, происходящих при соударении со снятием стружки, а с другой, предопределяют методы проектных расчетов, связанных с получением изделия заданной точности и качества, при производительности процесса точения не ниже проектной. По-этому цель работы, заключающаяся в исследовании особенностей инструментального обеспечения процесса точения поверхностей сложного профиля, может быть достигнута в результате применения как аналитических, так и экспериментальных методов с созданием моделей, пред-ставляющих возможность не только установления необходимых функциональных связей между инструментом и обрезываемой поверхностью заготовки, но и ран-жирование степени их влияния на работоспособность режущих элементов (Simo-nyan et. al., 2014; Ståhl, 2012).

Аналитический метод исследования реализуется геометрическим построе-нием арки циклоиды качением ее окружности диаметром, равным удвоенному значению глубины резания 2t, начиная от вершины режущего элемента по направлению к его периферии с образованием вогнутого профиля передней поверхности.

Для нахождения области (точки) оптимальных условий контакта (фактически безударных условий резания) требуется разделить полученный криволинейный профиль передней поверхности режущего элемента на n участков равной протяженности, причем мерной величине каждого из них (равной определенной степени прерывистости обрабатываемой поверхности k) будет соответствовать определенное значение переднего угла резца, т.е. от  $\gamma$ ,  $\gamma$  (рис. 3).

$$k = \frac{\tau_{\text{H.p}}}{\tau_{\text{H.p}} + \tau_{\text{x.p}}} \tag{1}$$

где  $au_{_{\!\mathit{H},\!\mathit{D}}}$  – время непрерывного резания поверхности заготовки;  $au_{_{\!\mathit{X},\!\mathit{D}}}$ . – время холо-стого пробега режущего элемента через элементы разрыва на обрабатываемой поверхности заготовки

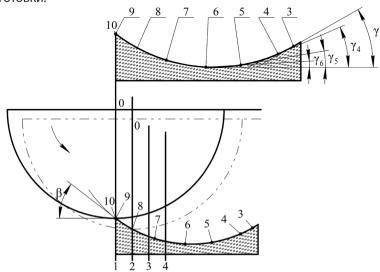


Рис. 3. Схема формирования профиля передней поверхности режущего элемента

Искомая область (точка контакта) благоприятной встречи режущего элемента с прерывистой поверхностью заготовки располагается в месте пересечения вектором угла β профиля циклоиды передней поверхности инструмента, что равнозначно созданию оптимальных условий первоначального контакта, из которых следует, что безударное врезание резца в обрабатываемую поверхность сложного профиля происходит в области передней поверхности сменной многогранной пластины на максимально возможном удалении как от хрупкой вершины, так и режущих кромок, являющемся гарантией высокой стойкости инструмента (см. рис. 3).

Например, при точении поверхности спирали (см. поз. 2, рис. 1) расчетное значение угла β равно:

$$tg\beta = \frac{l_{oc}\sqrt{b - \Delta a^2} - \Delta a\sqrt{b - l_{oc}^2}}{l_{oc}\Delta a + \sqrt{b - l_{oc}^2} \cdot \sqrt{b - \Delta a^2}}$$
(2)

где  $I_{oc}$  – длина обрабатываемого участка спиральной поверхности;  $\Delta t = t_{max} - t_{min}$  – изменение глубины резания вследствие колебания величины припуска;  $\Delta a = a_1 - a$  – величина смещения вершины режущего элемента вследствие погрешности настройки на заданное положение;  $\Delta r = r_{max} - r_{min}$  – перепад высот микропрофиля обработанной точением спиральной поверхности;  $b = (\Delta r - \Delta t)$ .

В нашем примере для обрабатываемой точением спиральной поверхности детали Ротор (см. поз. 2, рис. 1), согласно формуле (1), степень прерывистости составляет 70 %, что равнозначно расположению области (точки контакта) 5 на профиле циклоиды передней поверхности режущего элемента, полученной пере-сечением вектора угла  $\beta$  и переднего угла  $\gamma_c$ , равного (для данного примера) -8 °C (см. рис. 3).

В установленном положении оптимальных условий контакта режущего эле-мента с обрабатываемой поверхностью необходимо и достаточно, чтобы нагруз-ка вследствие прилагаемого усилия врезания и ударов на контактную площадку со стороны элементов разрыва обрабатываемой поверхности не превышала зна-чений наибольших эквивалентных напряжений, т.е.

$$P_{(Z)} = 2Q(\pi \cdot F^2)^{-1} \cdot \sqrt{F^2 - Z^2} \le \sigma_{\mathfrak{g}}^{\tau}, \sigma_{\mathfrak{g}}^{\sigma}$$
(3)

где Z – текущая координата по площадке контакта передней поверхности режущего элемента с обрабатываемой поверхностью заготовки; Q – нагрузка на режущий элемент при врезании в обрабатываемую поверхность на заданную глубину резания; F – площадь контактного участка, находящегося под воздействием усилий врезания и ударов со стороны элементов разрыва обрабатываемой поверхности:

$$F = \sum_{i=1}^{n} \sqrt{2Q \cdot \left[ \frac{2(1-\mu_1)^2}{\pi \cdot E_1} + \frac{2(1-\mu_2)^2}{\pi \cdot E_2} \right] \cdot (R')^{-1}}$$
(4)

n – количество элементов разрыва обрабатываемой поверхности;  $E_1$  и  $E_2$  – модуль упругости материала режущего элемента и заготовки соответственно;  $\mu_1$  и  $\mu_2$  – коэффициент Пуассона для материала режущего элемента и заготовки соответственно;

R' – приведенный радиус соприкасающихся поверхностей:  $R' = R_1^{-1} + R_2^{-1}$  , 1 – индекс режущего элемента; 2 – индекс обрабатываемой поверхности.

В общем случае стойкость режущего элемента определяется способностью инструментального материала сменной многогранной пластины воспринимать без разрушения динамические нагрузки процесса точения поверхностей сложного профиля заготовки (Kogaev, 1977; Maslov, 2008). Данное утверждение основано на результатах

экспериментальных исследований напряженности и работоспо-собности режущих элементов основных типов пластин из инструментального ма-териала композит 10. показавшего лучшие среди известных лезвийных материа-лов показатели работоспособности (Kudryashov, 2018; Sahin, 2009). Результаты исследования стойкостных испытаний приведены в табл. 1.

Таблица 1

Результаты исследования стойкости режущих элементов из композита 10

Скорость резания, м/с	Динамическая нагруз- ка на режущий эле- мент, д <sub>н</sub> , кН	Стойкость инструментального материала, $n_{e_{7}} \bullet 10^{5}$	Напряжения в режу- щем элементе, σ <sub>mir</sub> , МПа				
Пластина TPGN -11T308, форма T; длина передней поверхности– 8 мм; контактного участка – 4 мм							
6,3	126	3,5	170				
6,9	111	2,8	178				
7,8	151	8,3	120				
9,4	235	6,1	140				
Пластина CPGN -120408, форма C; длина передней поверхности– 8 мм; контактного участка – 4 мм							
6,3	151	3,5	200				
6,9	121	2,9	214				
7,8	168	8,8	139				
9,4	204	6,3	166				

В табл. 1 приняты следующие обозначения:

$$\Pi_{H} = \frac{m_{\pi} \cdot V}{I} \left[ \left( 1 - e^{-2d\tau} \right) + 2 \left( 2d \cdot ce^{-2dc} + e^{-2dc} - 1 \right) \right] \tag{5}$$

где  $m_a$  и  $m_a$  – масса детали и масса сменной многогранной пластины соответственно;  $I_{x}$  и  $I_{y}$  – длина передней поверхности и длина контактного участка передней поверхности режущего элемента с обрабатываемой поверхностью сложного профиля заготовки соответственно;  $c= au-2l_{_{
m I}}$  /  $l_{_{
m oc}}$  и  $2d=l_{_{
m I}}ig\lceil k_{_{
m I}}ig(m_{_{
m I}}+m_{_{
m I}}ig)ig
ceil^{-1}$  – эмпирические зависимости; т – время действия ударного импульса;  $k_{\rm n} = (1 - \mu_{\rm 1}^2)(E_{\rm 1} \cdot l_{\rm K})^{-1}$  – коэффициент податливости стыка материалов резца и заготовки в месте врезания. Циклическая стойкость инструментального материала, напряженность и работоспособность режущего элемента для заданных условий точения поверхностей сложного профиля зависят от скорости резания и энергии удара, передаваемой посредством прерывистости обрабатываемой поверхности и ее конструктивного оформления (Aleksandrov and Sokolinskii, 1969; Kogaev, 1977). Изменяя конструктивную сложность обрабатываемой поверхности, можно за счет улучшения технологичности расположенных на ней элементов разрыва в определенных пределах регулировать действующие в режущем элементе напряжения и влиять на его работоспособность. Комбинируя состояние прерывистости обрабатываемой поверхности и режимы резания, можно регулировать энергию удара заготовка-резец и, в конечном счете,

управлять работоспособностью инструмента (Ventura et. al., 2015).

Анализ полученных графических зависимостей (рис. 4 и 5) позволяет утверждать: 1) при прерывистости точения, составляющей до 20 % площади обрабатываемой поверхности участка № 2 прототипа (см. рис. 1), при скорости резания до 6 м/с, при геометрии режущего элемента: передний угол  $\gamma = -8^\circ$ , задний угол  $\alpha = 12^\circ$ , угол наклона главной режущей кромки  $\lambda = -3^\circ$ , главный угол в плане  $\phi = 45^\circ$ , радиус при вершине режущего элемента r = 0.5 мм, в условиях опти-мального контакта резец-заготовка происходит равномерный относительный износ режущего элемента; точность точения составляет 7-8 квалитет при шероховатости обработанной поверхности не грубее показателя  $Ra \le 0.63$  мкм:

- 2) при прерывистости обрабатываемой поверхности до 40 % (см. участок № 3 прототипа, рис. 1), появляется возможность за счет стабилизации процесса резания повысить производительность увеличением скорости точения до 9 м/с;
- 3) при прерывистости точения свыше 40 % (см. участок № 4 прототипа, рис. 1), в связи с резкими перепадами переходов резания и холостого пробега через элементы разрыва обрабатываемой поверхности, циклическая стойкость режущего элемента резко падает вследствие зарождения и лавинообразного распространения усталостных трещин, стимулирующих хрупкое разрушение режущего элемента сменной многогранной пластины. Причем, чем больше глубина и скорость резания, количество и площадь элементов разрыва, тем большее количество пиковых нагрузок может возникнуть в течение одного цикла точения.

В общем случае работоспособность режущего элемента при точении поверхности сложного профиля аппроксимируется зависимостью вида

$$P_{P\Theta} = N_o \cdot \sigma_{R \cdot N_o} / \sigma_R \quad (6)$$

где  $\sigma_{R:N_o}$  – предел выносливости материала режущего элемента для числа циклов  $N_o$ , соответствующих его заданной работоспособности;  $\sigma_R$  – напряжения, соответствующие началу разрушения режущего элемента при предельно допустимом количестве циклов No, состоящих из переходов врезания, резания, холостого пробега через элементы разрыва и нового врезания, и т. д. (см. рис. 1).

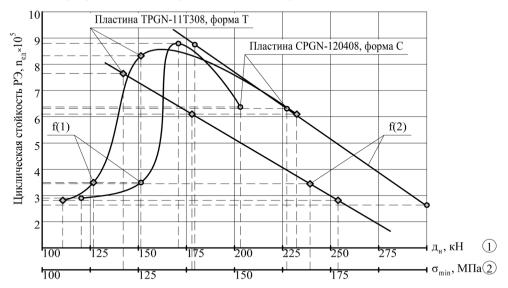


Рис. 4. Зависимость циклической стойкости режущего элемента от силовых нагрузок прерывистого точения

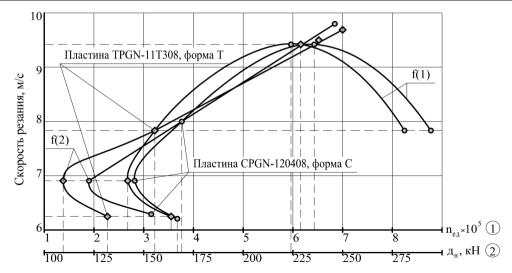


Рис. 5. Влияние скорости резания на циклическую стойкость режущего элемента Следует иметь в виду, что результаты моделирования работоспособности режущих элементов и рекомендации по сохранению стойкости сменных многогранных пластин для реальных деталей в условиях оптимального врезания передней поверхности в поверхность сложного профиля заготовки будут отличаться. Несовпадения связаны с ограниченной номенклатурой сменных многогранных пластин по таким параметрам, как профиль передней поверхности, конструктивное оформление режущего элемента и др. Т. е. имеет место частичное отличие именно тех характеристик моделирования сменных многогранных пластин с реально выпускаемой номенклатурой, которые обеспечивают условия гашения ударных нагрузок и дают возможность точению успешно конкурировать со шлифованием. Иначе, среди выпускаемой номенклатуры сменных многогранных пла-стин вряд ли всегда найдется такая пластина, которая идеально подойдет для обработки поверхности определенного профиля. Авторы видят решение проблемы не в искусственном многообразии пластин, а в проведении на этапе проектирования технологии механической обработки группирования деталей по близкой и совместной конструктивной сложности. Например, объединить детали, имеющие коэффициент прерывистости от 5 до 10 %, от 10 до 15 % и т. п., а для них проектировать групповой инструмент, способный обеспечить в каждой из создаваемых групп реальных деталей одинаково высокие показатели точности и качества.

### **ВЫВОДЫ**

- 1. Представлен методический подход к расчетам и обоснованию инстру-ментального обеспечения, основанный на аналитической оценке и сравнительном анализе экспериментальных результатов.
- 2. Методом моделирования определены рациональные условия взаимодей-ствия режущего элемента с поверхностью заготовки сложного профиля, обеспечивающие повышение работоспособности инструмента перераспределением ударной нагрузки прерывистого резания от хрупкой вершины вглубь передней поверхности сменной многогранной пластины.
- 3. Результаты обобщения закономерностей, выявленных в процессе точения поверхностей заготовок сложного профиля, позволяют утверждать о наличии предела допустимой прерывистости, а именно: площадь элементов разрыва, рав-ная 40 %

- общей площади обрабатываемой поверхности, превышение которого активно развивает усталостное разрушение хрупкой вершины режущего элемента.
- 4. Анализ результатов аналитических и экспериментальных исследований свидетельствует о возможности практического применения операции точения для обработки поверхностей сложного профиля, при этом работоспособность режущего элемента из инструментального материала композит 10 зависит от:
- применения оптимальной марки инструментального материала, способ-ной к обработке поверхностей заготовок различной конструктивной сложности и достижению заданных показателей точности и качества при установленном уровне производительности процесса точения;
- конструктивного оформления сменных многогранных пластин проход-ных резцов;
- режимов резания и, в первую очередь, скорости резания.

#### REFERENCES

- 1. Aleksandrov E.V., Sokolinskii V.B. Prikladnaya teoriya i raschety udarnykh sistem [Applied theory and calculations of impact systems]. Moskva: Nauka, 1969.
- 2. Altintas Y. Manufacturing automation: metal cutting mechanics, machine tool vibrations, and CNC design. Cambridge university press, 2012.
- 3. Andreev V.N., Borovskii G.V., Grigor'ev S.N. Instrument dlya vysokoproizvoditel'nogo i ekologicheski chistogo rezaniya [Tool for high-performance and ecologically cutting]. Moskva: Mashinostroenie, 2010.
- 4. Bushlya V.M., Gutnichenko O.A., Zhou J.M., Ståhl J.E., Gunnarsson S. Tool wear and tool life of PCBN, binderless cBN and wBN-cBN tools in continuous finish hard turning of cold work tool steel. Journal of Superhard Materials, 36(1), 2014. P. 49-60.
- 5. Carou D., Rubio E.M., Davim J.P. Discontinuous cutting: failure mechanisms, tool materials and temperature study-a review. Reviews on Advanced Materials Sci-ence, 38(2), 2014.
- 6. De Vos P. Applied metal cutting physics Best practice. Fagersta. SECO Tools AB, 28016.
- 7. Grubyi S.V., Lapshin V.V. Issledovanie rezhushchikh svoistv reztsov iz nitrida bora [Study of cutting properties of boron nitride cutting tools]. Nauka i obra-zovanie: nauchnoe izdanie MGTU im. N.E. Baumana, (06), 2012.
- 8. Grzesik W., Żak K., Chudy R. Influence of tool nose radius on the cutting performance and surface finish during hard turning with CBN cutting tools. Journal of Machine Engineering, 17, 2017.
- 9. Grzesik W., Żak K., Kiszka P. Comparison of surface textures generated in hard turning and grinding operations. Procedia CIRP, 13, 2014, p. 84-89.
- 10. Hassan M., Sadek A., Damir A., Attia M.H., Thomson V. Tool Pre-Failure Monitoring in Intermittent Cutting Operations. In ASME 2016 International Mechanical Engineering Congress and Exposition (pp. V002T02A049-V002T02A049). American Society of Mechanical Engineers, 2016.
- 11. Ko T.J., Kim H.S. Surface integrity and machineability in intermittent hard turning. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 18(3), 2001, p. 168-175.
- 12. Kogaev V.P. Raschety na prochnosť pri napryazheniyakh, peremennykh vo vremeni [Calculations for strength at time-varying tensions]. Moskva: Mashinostroenie, 1977.
- 13. Kudryashov E.A., Smirnov I.M., Grishin D.V., Khizhnyak N.A. An Overview of Promising Grades of Tool Materials Based on the Analysis of their Physical-Mechanical Characteristics. Russian Physics Journal, 61, 2018, p. 248-252.
- 14. Kudryashov E.A., Smirnov I.M., Yatsun E.I., Pavlov E.V. Improved Tools for the Turning of Complex Surfaces. Russian Engineering Research, 38, 2018, p. 223-228.
- 15. Legutko S., Zak K., Kudlacek J. Characteristics of geometric structure of the surface

- after grinding. In MATEC Web of Conferences (Vol. 94, p. 02007). EDP Sciences, 2017.
- 16. Li S., Chen T., Qiu C., Wang D., Liu X. Experimental investigation of high-speed hard turning by PCBN tooling with strengthened edge. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 92(9-12), 2017, p. 3785-3793.
- 17. Loladze T.N. Prochnost' i iznosostoikost' rezhushchego instrumenta [Strength and wear resistance of the cutting tool]. Moskva: Mashinostroenie, 1982.
- 18. Maslov A.R. Raschety na prochnosť pri napryazheniyakh, peremennykh vo vremeni [Metal Cutting in modern mechanical engineering]. Moskva: ITO, 2008.
- 19. Özel T. Modeling of hard part machining: effect of insert edge preparation in CBN cutting tools. Journal of Materials Processing Technology, 141(2), 2003, p. 284-293.
- 20. Pavlov E.V. Sovershenstvovanie protsessa tokarnoi obrabotki rotatsionnykh detalei s preryvistymi poverkhnostyami [Improvement of the turning process of rotational parts with interrupted surfaces]. Izvestiya Volgogradskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta, (9), 2017, p. 58-61.
- 21. Sahin Y. Comparison of tool life between ceramic and cubic boron nitride (CBN) cutting tools when machining hardened steels. Journal of materials processing technology, 209(7), 2009, p. 3478-3489.
- 22. Simonyan M.M., Balayan V.A., Kazaryan N.E. O metodike eksperimental'nogo issledovaniya temperaturnykh, adgezionnykh i udarnykh yavlenii pri preryvistom rezanii [On the technique of experimental investigation of temperature, adhesion and impact phenomena during intermittent cutting]. Austrian Journal of Technical and Natural Sciences, (11-12), 2014.
- 23. Ståhl J.E. Metal cutting. Theores and models. Lund. Sweden: SECO TOOLS, 2012.
- 24. Ventura C.E.H., Köhler J., Denkena B. Influence of cutting edge geometry on tool wear performance in interrupted hard turning. Journal of Manufacturing Process-es, 19, 2015, p. 129-134.
- 25. Żak K. Cutting Mechanics and Surface Finish for Turning with Differently Shaped CBN Tools. Archive of Mechanical Engineering, 64(3), 2017, p. 347-357.