

Повышение производительности финишной обработки деталей лезвийным инструментом

Проанализированы возможности повышения производительности финишной лезвийной обработки за счет управления режимами резания. Рассмотрены перспективные подходы к повышению величины подачи и скорости резания на примерах безвершинного резца, инструментов, оснащенных поликристаллическими сверхтвердыми композитами на основе кубического нитрида бора, инструментов с защитными покрытиями.

Применение инструментов, разработанных с учетом особенностей явлений, протекающих в зоне резания, использование режущих инструментов со специальными защитными покрытиями обеспечивает возможность выполнения финишной лезвийной обработки с высокой производительностью.

Ключевые слова: лезвийный инструмент; производительность обработки; шероховатость обработанной поверхности; поликристаллические сверхтвердые материалы.

Введение. Тенденции развития процессов механической обработки, как любой технической системы [16], связаны с направленным обеспечением получения максимального результата с минимальными затратами. Применительно к финишным технологиям обработки максимальный результат связан с производительностью съема материала припуска и формированием в поверхностном слое изделия такого состояния, которое бы наилучшим образом обеспечивало работоспособность изделия в эксплуатации.

Соответствие процессов обработки отмеченной тенденции обеспечивается за счет увеличения зоны взаимодействия инструмента с изделием, интенсивности взаимодействия инструмента с изделием ряда других подходов.

Увеличение зоны взаимодействия инструмента с изделием достигается прежде всего за счет увеличения размеров инструмента, применения одновременно нескольких работающих инструментов, увеличения площади контактирования инструмента с изделием, замены точечного контакта инструмента с изделием на линейный, распределенный по поверхности или объемный, увеличения числа видов взаимодействия инструмента с изделием, суммирования различных типов взаимодействия инструмента с изделием. Увеличение интенсивности взаимодействия инструмента с изделием достигается за счет увеличения энергетического действия инструмента на изделие, обработки термообработанных материалов, уменьшения машинного времени за счет увеличения скорости относительного перемещения инструмента и изделия.

Современные процессы финишной механической обработки базируются на результатах широкого круга научных исследований природы и закономерностей протекания механических и физико-химических явлений в зоне контактирования инструмента с изделием с учетом действия среды, окружающей зону обработки, механизмов изнашивания и разрушения инструментов, закономерностей формирования состояния поверхностного слоя изделий в процессе обработки. Их результаты являются залогом создания нового инструмента, успешно работающего как по сырым, так и по упрочненным материалам в условиях ударных и безударных нагрузок, позволяя в значительной степени заменить операцию шлифования на резание, упростить кинематику и конструкцию станков.

Учитывая, что при финишной обработке удаляется припуск незначительной величины, производительность процесса характеризуется площадью поверхности детали, обработанной в единицу времени. Таким образом, основными факторами, влияющим на производительность финишной механической обработки, являются скорость резания и подача инструмента. Шероховатость обработанной поверхности также определяется этими параметрами режима резания.

Одновременное обеспечение производительности процесса и требуемых параметров состояния поверхностного слоя изделий обработки во многом связано с применением режущих инструментов, оснащенных соответствующими материалами и имеющими оптимальную для каждого конкретного случая конструкцию.

Цель настоящей работы – анализ подходов к повышению производительности финишной обработки лезвийным инструментом.

Повышение подачи. Как показано в [7, 8] основными причинами образования микронеровностей на обработанной поверхности в традиционных процессах лезвийной обработки являются копирование геометрических параметров рабочего участка инструмента с учетом величины подачи и пластические

явления перед передней поверхностью инструмента, связанные с наличием у него двух режущих кромок. С учетом этого, эффективным средством снижения шероховатости обработанной поверхности является применение безвершинного (бреющего) инструмента.

В работе [14] приведены кинематико-геометрические зависимости для определения высоты микронеровностей на обработанной поверхности R_z и активной длины режущей кромки L при резании безвершинным инструментом:

$$R_z = \frac{S^2 \operatorname{tg}^2 \lambda}{4(2R - 2t)}; \quad (1)$$

$$L = \frac{\sqrt{2 \cdot R \cdot t}}{\sin \lambda} + \frac{S}{2 \cos \lambda}, \quad (2)$$

где R – радиус обрабатываемой детали; t – глубина резания.

Главным фактором, ограничивающим величину подачи, а значит и производительность обработки, является длина активной части режущей кромки (или ширина среза) инструмента.

Для обеспечения заданной шероховатости нужно выбрать такое значение угла наклона режущей кромки λ , которое даст возможность вести обработку с максимальной подачей, учитывая ограничения, накладываемые размером рабочей части используемого инструмента.

Создать условия, при которых увеличение подачи не вызовет значительного роста высоты микронеровностей на обработанной поверхности, а активная длина режущей кромки инструмента не превысит допустимого значения, можно если придать последней соответствующую форму [5]. Такой формой может быть окружность, имеющая радиус, соответствующий радиусу кривизны эллипса, образованного в сечении детали плоскостью наклоненной к ее оси под углом λ в точке пересечения эллипса с малой его полуосью. В таком случае, форма микронеровностей в продольном сечении детали будет более полой, а их высота значительно снизится. Очевидно, что одновременно увеличится и ширина среза, однако этого можно избежать, если в виде окружности формировать лишь одну часть кромки, оставляя другую – расположенную ниже точки скрещивания режущей кромки и оси детали – прямолинейной (рис. 1).

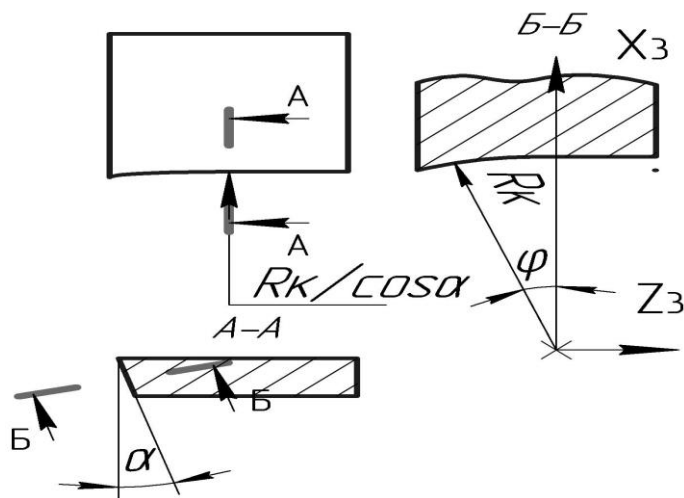


Рис. 1. Эскиз режущей части инструмента с криволинейной режущей кромкой

Задняя поверхность инструмента должна иметь вогнутую форму. При этом в сечении Б–Б она будет цилиндрической с радиусом R_k . В этом случае, при $\gamma = 0^\circ$, режущая кромка представляет собой эллипс с полуосями R_k и $R_k/\cos\alpha$.

Задавая движение линии контакта поверхности детали и режущей кромки инструмента (вращательное вокруг продольной оси детали и прямолинейное вдоль нее) можно установить винтовой профиль обработанной поверхности. Для определения высоты микронеровностей необходимо найти кривую пересечения этой винтовой поверхности и осевой плоскости детали.

Форма огибающей в осевом сечении показана на рисунке 2. Сплошной линией на рисунке обозначена огибающая, образующаяся в случае, если режущая кромка имеет криволинейный участок, пунктирной – если кромка прямолинейна. Как видно, правая ветвь кривой, соответствующая участку режущей кромки заточенной по радиусной форме, существенно более полая, чем левая (прямолинейный участок). Найдя точку пересечения двух огибающих, смещенных относительно друг друга на расстояние, равное подаче S , определим высоту микронеровностей. На рисунке 3 показана схема для расчета L .

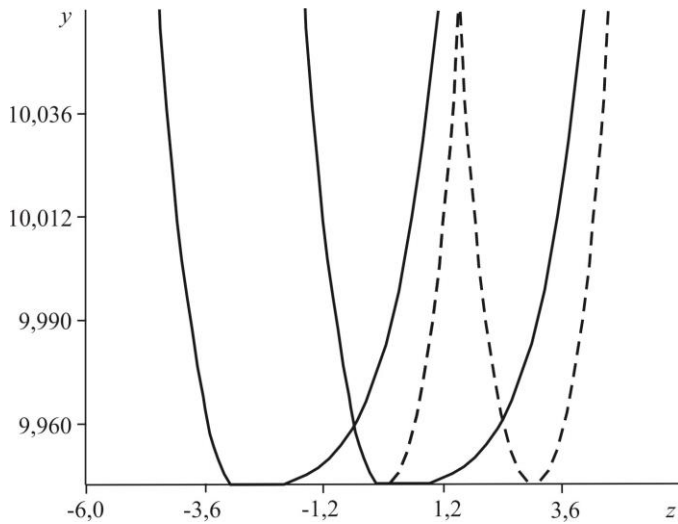


Рис. 2. Схема определения высоты микронеровностей в осевом сечении детали: – прямолнейная режущая кромка; кромка, имеющая участок радиусной формы

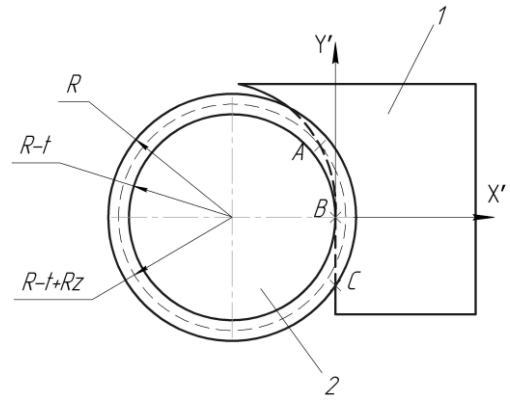


Рис. 3. Схема для расчета длины активной части режущей кромки: ABC – участок режущей кромки инструмента, внедренный в обрабатываемый материал на глубину резания t ; окружность радиуса R соответствует необработанной детали; Rz – высота микронеровностей; 1 – инструмент; 2 – деталь

Результаты расчетов высоты микронеровностей и величины L_{min} представлены на рисунку 4. Там же для сравнения приведены результаты расчетов Rz и L_{min} по зависимостям (1) и (2) в случае применения инструмента с прямолнейной режущей кромкой.

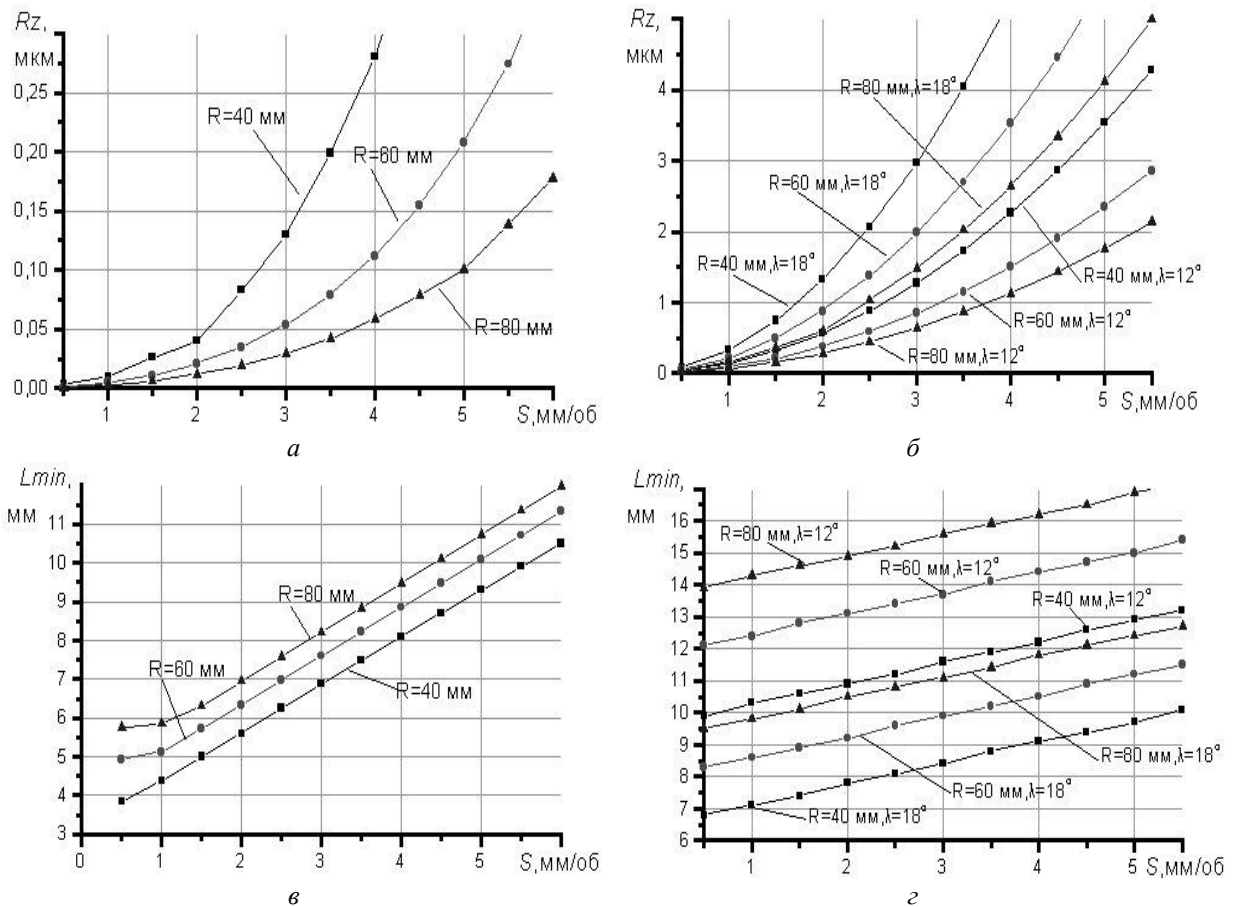


Рис. 4. Расчетная высота микронеровностей Rz (а, б), величина L_{min} (в, г) в зависимости от подачи и радиуса заготовки:
а, в – режущая кромка с участком радиусной формы;
б, г – прямолнейная режущая кромка

Анализ зависимостей показывает, что за счет изменения формы режущей кромки бреющего инструмента можно достичь снижения расчетных значений R_z , при той же величине подачи, в 10–15 раз. Это снижение тем больше, чем меньше диаметр обрабатываемой детали, больше подача и угол наклона λ у инструмента с прямолинейной кромкой.

Учитывая влияние вибраций, износ инструмента, пластические явления перед передней поверхностью инструмента в зоне резания и т.д. в реальном процессе обработки, особенно при больших подачах, расчетный уровень микронеровностей недостижим. Однако предлагаемый способ делает возможным увеличение подачи в 2–3 раза без образования характерных для «бреющей» обработки микронеровностей, расчетная величина которых для $R = 80$ мм при $\lambda = 18$ и $S = 5$ мм/об составляет уже $R_z 4$.

Сравнивая полученные результаты заметим что, если радиусная кромка позволяет применять подачи до 5–6 мм/об и при этом величина L_{min} не превышает 12,5 мм даже для $R = 80$ мм, то обычный косоугольный безвершинный инструмент работает с более широкой режущей кромкой.

Повышение скорости резания. Подходы, обеспечивающие повышение производительности обработки за счет увеличения скорости резания, рассмотрим на примере инструмента, оснащенного поликристаллическими сверхтвёрдыми материалами (ПСТМ) на основе кубического нитрида бора (cBN).

Учет представленных в [7, 9] механизмов изнашивания инструментов с ПСТМ на основе cBN позволяет управлять их работоспособностью, как на стадии производства, так и в процессе эксплуатации.

Вводя в состав ПСТМ или технологической среды вещества, являющиеся ингибиторами реакций взаимодействия инструментального материала с обрабатываемым и элементами окружающей среды или сдвигающие протекание этих реакций в более высокотемпературную область, можно увеличить производительность обработки изделий за счет роста скорости резания.

Повышению работоспособности инструментов способствует создание в зоне резания повышенного парциального давления азота. Такая среда, в соответствии с принципом Ла-Шателье, обуславливает увеличение температуры образования боридов Me_xB_y – рост парциального давления азота до 100 Па повышает температуру образования боридов на 150–300° (рис. 5), что позволяет повысить скорость резания при обработке сплавов на основе Fe и Ni.

Нужно отметить, что наличие в зоне резания повышенного парциального давления азота также способствует снижению окисления инструментального материала при температурах, сопутствующих процессу резания.

Представляется возможным обработка в камере с повышенным давлением азота и использование инструмента, в состав композита которого введены составляющие (например, Si_3N_4) или на рабочие поверхности инструмента нанесено покрытие (например, NbN), которые, под действием термобарических условий процесса обработки, обеспечивают в зоне резания повышенное парциальное давление азота без снижения механических свойств композита.

На основе результатов модельных исследований, на рисунку 8 приведена схема влияния химического взаимодействия в зоне резания на износ инструмента, оснащенного ПСТМ на основе cBN – композита ($cBN-Si_3N_4$) и композита ($cBN-Si_3N_4$ с покрытием $Al_2O_3-NbN-Ti$).

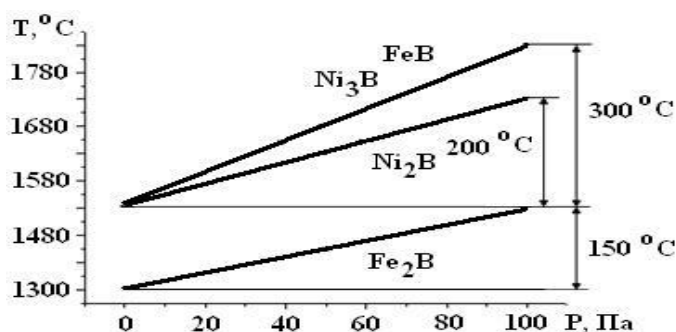


Рис. 5. Влияние парциального давления азота в контактной зоне на увеличение температуры образования боридов Fe и Ni

На основе результатов модельных исследований, на рисунку 8 приведена схема влияния химического взаимодействия в зоне резания на износ инструмента, оснащенного ПСТМ на основе cBN – композита ($cBN-Si_3N_4$) и композита ($cBN-Si_3N_4$ с покрытием $Al_2O_3-NbN-Ti$).

Отмеченная на рисунку 6 разница температур протекания реакций взаимодействия материала инструментов с композитами (cBN), ($cBN-Si_3N_4$), ($cBN-Si_3N_4$) + ($Al_2O_3-NbN-Ti$) с материалом обрабатываемой детали в зоне резания обуславливает возможность повышения скорости резания при обработке инструментами по двум последним вариантам (рис. 7).

Повышение скорости резания приводит к увеличению температуры на контактных участках инструмента. Повысить работоспособность инструментов при обработке с высокими скоростями резания возможно при условии эффективного отвода тепла от контактных поверхностей инструмента или за счет оснащения инструмента композитами, механические и химические свойства которых в меньшей степени зависят от температуры. Одним из вариантов, обеспечивающих это, является оснащение инструмента композитом с меньшей теплопроводностью, что позволит отвести тепло из зоны резания в стружку.

Система cBN – (Fe-Ni-Cr)							
Температура 1380 °C				Температура 1177 °C			
↓		↓		↓		↓	
Образование $(Fe, Ni, Cr)_x B_y$, $(Fe, Ni, Cr)_x B_y O_z$ при взаимодействии (Fe, Ni, Cr) с cBN		+ N ₂		→		Образование и плавление эвтектик типа Fe-Fe ₂ B в системе cBN – (Fe, Ni, Cr)	
						→ Износ	
Система (cBN-Si ₃ N ₄ /NbN) – (Fe-Ni-Cr)							
Температура 1080–1100 °C		Температура 1530–1680 °C			Температура 1400–1440 °C		
↓		↓			↓		
Образование $(Fe, Ni, Cr)_x (Si/Nb)_y$, $(Fe, Ni, Cr)_x (Si/Nb)_y O_z$ при взаимодействии (Fe, Ni, Cr) с Si ₃ N ₄ и NbN		+ N ₂		→		Образование плавление эвтектик типа Fe-Fe ₂ B в системах (cBN-Si ₃ N ₄ /NbN) – (Fe, Ni, Cr)	
						→ Износ	

Рис. 6. Модельная схема влияния химического взаимодействия в зоне резания на износ инструмента, оснащенного ПСТМ на основе cBN [7]

Исследовалась работоспособность инструментов, оснащенных композитами групп ВН (cBN 97 об. % - Si₃N₄ 3 об. %) ($\lambda = 120-150$ Вт/м·К) и ВЛ (cBN 52 об. % - Si₃N₄ 3 об. % - TiC 45 об. %) ($\lambda = 40-50$ Вт/м·К).

Исследования контактного взаимодействия на передней поверхности инструментов показали, что при скоростях 90–100 м/мин для инструментов с композитами групп ВН и ВЛ коэффициент усадки стружки имеет близкие значения, что говорит об одинаковой степени пластической деформации в зоне резания.

При увеличении скорости резания до 200 м/мин коэффициент усадки стружки для инструмента с композитом группы ВЛ уменьшается, что свидетельствует о более благоприятных условиях стружкообразования – снижается степень деформации материала на рабочих поверхностях инструмента и увеличивается скорость схода стружки по передней поверхности инструмента, вследствие чего, на снятие припуска затрачивается меньшее усилие.

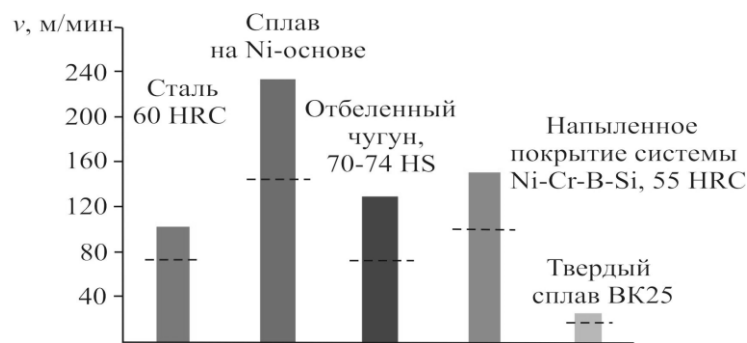


Рис. 7. Скорость резания инструментами с композитом (cBN-AlB₁₂, Al₂O₃) (под чертой) и (cBN-Si₃N₄) (выше черты) [13]

Зная размер участков контакта и значения контактных напряжений можно построить эпюры распределения нормальных и касательных контактных напряжений на передних поверхностях инструментов (рис. 8, [2]).

Анализ эпюр распределения напряжений на длине контакта стружки с передней поверхностью инструмента с ПСТМ с низким содержанием нитрида бора показывает, что нормальные напряжения достигают 3,0 ГПа, для инструментом с ПНТМ группы ВН – 2,1 ГПа. Увеличение уровня нормальных напряжений при работе инструментами с ПСТМ группы ВЛ объясняется тем, что при высоких скоростях резания происходит интенсивное уменьшение длины контакта стружки с передней поверхностью

инструмента, при этом сила резания почти не меняется и находится в диапазоне 100–120 Н, в результате чего нормальные напряжения растут.

Касательные напряжения имеют существенно меньшие значения (0,18 ГПа) по сравнению с инструментом с ПНТМ группы ВН (0,58 ГПа). Такой характер изменения касательных напряжений при использовании инструментов с ПСТМ с низким содержанием ВН связан с увеличением температуры резания, что ведет к размягчению обрабатываемого материала.

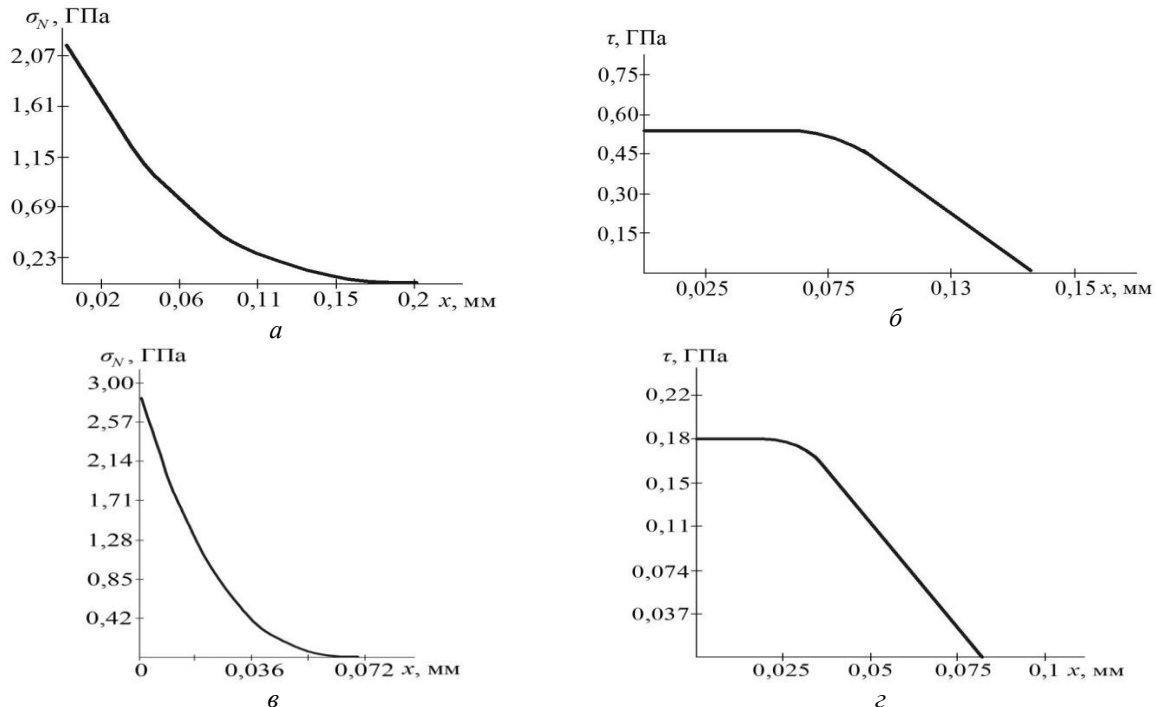


Рис. 8. Распределение нормальных (а, в) и касательных (б, г) напряжений вдоль контакта стружки с передней поверхностью инструментов с ПСТМ групп ВН (а, б – $v = 90$ м/мин; $S = 0,12$ мм/об; $t = 0,2$ мм) и VL (в, г – $v = 200$ м/мин; $S = 0,10$ мм/об; $t = 0,2$ мм) при точении стали ХВГ (62–64 HRC)

Скорости изнашивания инструментов, оснащенных композитами группы ВН и VL, при точении закаленной стали, представлены на рисунке 9. При точении со скоростями резания 90–120 м/мин скорость изнашивания инструментов составляет 3–9 мкм/мин, а стойкость инструментов при достижении величины износа по задней поверхности $h_3 = 0,4$ мм – более 60 мин.

С увеличением скорости резания до 175 м/мин износ инструмента с ПСТМ группы ВН имеет крайне интенсивный характер. Резкий ступенчатый рост составляющих силы резания P_y и P_z свидетельствует об образовании микросколов на режущих кромках и контактных поверхностях инструмента.

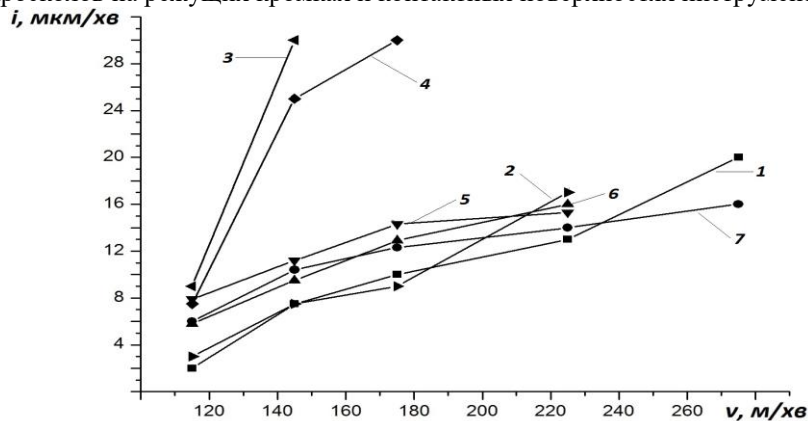


Рис. 9. Зависимость скорости изнашивания инструмента с ПСТМ от скорости резания при точении стали ШХ15 (62–64 HRC) ($S = 0,1$ мм/об; $t = 0,2$ мм): 1 – CBN100 (Япония); 2 – WBN565 (Германия); 3 – Томал-10 (Россия); 4 – (сBN 97 об. %-Si₃N₄ 3 об. %); 5–7 – инструмент с композитами (wBN 45–55 об. %-TiN); (wBN 45–55 об. %-TiC); (сBN 45–55 об. %-TiC)

При скоростях резания 220–275 м/мин инструмент с композитами группы VL сохраняет высокую работоспособность. При этом стружка нагревается до высокой температуры и одним из главных условий проведения процесса обработки является безопасный и быстрый отвод стружки (рис. 10).



Рис. 10. Точение заготовки из стали ШХ 15 (62–64 HRC) инструментом с композитом (сBN 45–55 об. %-TiC) (скорость резания $v = 250$ м/мин)

Представленные выше примеры свидетельствуют о возможности значительного повышения производительности обработки за счет применения в режущих инструментах композитов, свойства которых отвечают термобарическим условиям в зоне обработки.

Необходимость защиты и упрочнения поверхностей инструмента, даже в случае, когда в его конструкции используются материалы с комплексом повышенных физико-механических свойств, вытекает из двух обстоятельств [13]. Во-первых, именно поверхностный слой является наиболее уязвимыми при работе режущих инструментов. Во-вторых, в поверхностном слое нагруженных тел развиваются процессы, являющиеся синергетическим активатором процессов во всем объеме материала.

Эффективным методом повышения работоспособности инструмента является нанесение на его рабочие поверхности покрытия. Учитывая сложность и взаимовлияние факторов, имеющих место при эксплуатации инструментов, при выборе покрытия целесообразно использовать подходы системного анализа [15]. Система «инструмент с покрытием» представляется трехуровневой.

На третьем уровне $\{M_3\}$ решаются задачи формирования архитектуры покрытия в соответствии с эпюрой эксплуатационного нагружения рабочих поверхностей инструмента. При этом необходимо обеспечить формирование таких параметров покрытия и такого состояния его поверхностного слоя, которые отвечали бы равновесному состоянию для условий конкретного эксплуатационного нагружения, что и решается на втором уровне $\{M_2\}$ системы. На уровнях $\{M_3\}$ и $\{M_2\}$ рассматриваются функционально ориентированные покрытия на локальных участках инструмента, контактное нагружение и эксплуатационные требования к которым могут быть различными. Первый уровень системы $\{M_1\}$ связан с формированием комплекса функциональных покрытий на всех участках инструмента, подвергающихся различному эксплуатационному нагружению.

Предварительная подготовка поверхности под нанесение покрытия должна рассматриваться как отдельная составляющая технологии, оказывающая, за счет технологической наследственности, влияние на всю систему обеспечения работоспособности инструмента.

Между подсистемами $\{M_3\}$ и $\{M_2\}$ существует сложное взаимодействие – создание определенной архитектуры покрытия (слоистость, градиентность, дискретность и т.д.), разработанной на уровне $\{M_3\}$, требует технологического обеспечения на уровне $\{M_2\}$ с учетом технологичности метода нанесения и возможностей имеющегося оборудования. Технологическое обеспечение состояния поверхностного слоя, отвечающего приработанному, на уровне $\{M_2\}$ связано, в свою очередь, с архитектурными решениями уровня $\{M_3\}$. Уровень $\{M_1\}$ призван решить вопрос о формировании покрытия на всех участках инструмента в зависимости от его материала и условий эксплуатационного нагружения. Реализация разработки на уровне $\{M_1\}$ обусловлена синергетическим объединением в пределах инструмента или группы инструментов результатов, полученных на уровнях $\{M_3\}$ и $\{M_2\}$.

В результате взаимодействия подсистем $\{M_3\}$ - $\{M_2\}$ - $\{M_1\}$ в зависимости от условий эксплуатационного нагружения, преобразование входов системы $\{X\}$ в ее выходы $\{Y\}$ в значительной степени обусловлено напряженным состоянием инструмента с покрытиями.

Это дает основание рассматривать вопросы о формировании устойчивой естественной архитектуры поверхностного слоя, повышающей самоорганизацию системы при эксплуатационном нагружении. В этом свете представляется справедливым подход, когда создание «рационального» нагруженного

состояния рассматривается комплексно, как результат вклада эффектов на трех уровнях системы. Под «рациональным» напряженным состоянием понимается сочетание «полезного» уровня остаточных напряжений сжатия в покрытии и минимального вклада от эксплуатационных напряжений, связанных с условиями применения инструмента.

Как отмечено выше, изнашивание инструмента с ПСТМ на основе cBN при высоких скоростях резания во многом определяется химическим взаимодействием материала инструмента с обрабатываемым и элементами окружающей среды. В этом случае к покрытию на режущем инструменте, кроме отмеченных требований, связанных с архитектурными особенностями, высокими механическими свойствами, наличием определенного уровня напряжений, предъявляются требования по химическому составу, обуславливающим ингибиторные свойства в отношении отмеченных реакций. Такое покрытие может быть названо «активным».

Для минимизации изнашивания инструмента за счет снижения интенсивности химического взаимодействия в зоне резания «активное» покрытие должно обеспечить отсутствие реализации на контактных поверхностях инструмента химических реакций с образованием боридов типа Me_xB_y . Система $Al_2O_3-NbN-Ti$ является вариантом такого покрытия (рис. 11).

Температура в зоне резания, соответствующая реализации на рабочих участках инструмента эффекта контактно-реактивного плавления, составляет $\sim 1200^\circ C$. Это средняя температура, которая может быть принята, как температура резания.

В то же время, на локальных контактных участках на рабочих поверхностях инструмента (на пятнах вспышки) имеет место значительно более высокая температура. Теоретический анализ, проведенный в [10], показывает, что эта температура превышает $2000^\circ C$. На локальных контактных участках на рабочих поверхностях инструмента реализуется этап химического взаимодействия с образованием боридов. Таким образом, идеальное «активное» покрытие должно обладать высокими механическими свойствами и быть ингибитором реакции взаимодействия материала инструмента с обрабатываемым материалом при температуре более $2000^\circ C$.

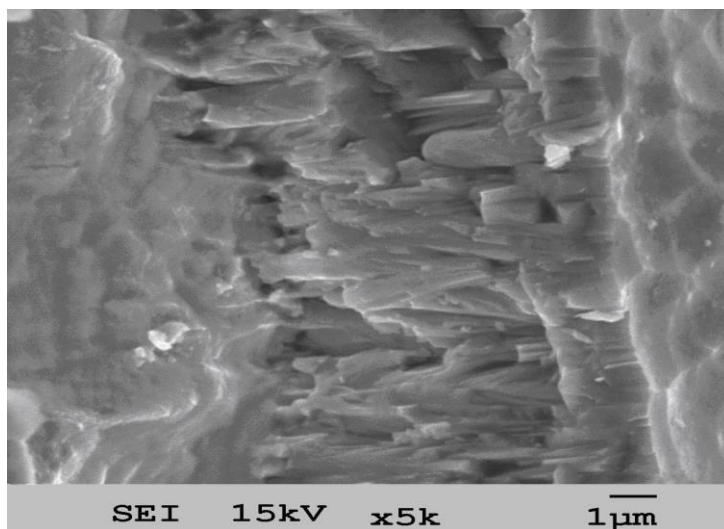


Рис. 11. Излом режущей пластины из композита ($cBN-Si_3N_4$) с покрытием ($Al_2O_3-NbN-Ti$)

Другим подходом к созданию покрытий на инструментах, оснащенных ПСТМ на основе cBN , является применение в покрытиях материалов, снижающих температуру на пятнах вспышки. Для получения таких покрытий целесообразно использовать материалы, характеризующиеся аномально низким коэффициентом трения и низким значением модуля упругости.

Традиционно принимается [6, 4], что покрытия на режущем инструменте должны иметь твердость в 1,5–2,0 раза превышающую твердость инструментального материала. Однако, в случае инструмента из ПСТМ на основе cBN , в отношении покрытия речь может идти о твердости, «достаточной» для эффективной реализации процесса резания.

Для материалов покрытия и инструмента желательно максимальное подобие кристаллохимических параметров и минимальное отличие физико-механических и теплофизических свойств при температуре резания. Применительно к инструменту, оснащеному ПСТМ на основе cBN , этому комплексу свойств отвечает покрытие из BN в аморфном состоянии [12]. Анализ работоспособности такого покрытия показал, что оно выполняет роль твердой смазки в зоне резания.

Для повышения эффективности инструмента в условиях работы в высокоскоростном диапазоне обработки предложены самоадаптивные покрытия. Основная функция которых заключается не в снижении интенсивности окисления материала инструмента, а в использовании этого явления для управления параметрами контактного взаимодействия при резании, снижения коэффициента трения и, следовательно, термобарической нагрузки в зоне контакта. Подобное покрытие в процессе резания окисляется, образуя полиоксидную вторичную структуру (трибопленку) играющую роль твердой смазки [2]. В работе [3] в качестве такого покрытия предложена система AlN-Ti(Cr)B_2 . При эксплуатации инструмента на поверхности покрытия образуется полиоксидная трибопленка включающая Al_2O_3 , Fe_2O_3 и оксинитрид алюминия $\text{Al}_x\text{O}_y\text{N}_z$. Данные соединения обладают термостабильностью до $1300\text{ }^\circ\text{C}$, кроме того в подобных системах образуются гомологические ряды твердых растворов оксидов, имеющие хорошую смазывающую способность. Исследования элементного состава покрытия после обработки резанием показали, что на глубине 70 нм происходит резкое увеличение количества кислорода, т. е. наружный наноразмерный слой окисляется, переходя в продукты износа, а затем цикл повторяется. При этом в подслое расположенном на глубине от 30 до 70 нанометров образуются ограниченные твердые растворы на основе Al_2O_3 систем ($\text{Al}_2\text{O}_3\text{-Fe}_2\text{O}_3$, $\text{Al}_2\text{O}_3\text{-TiO}_2$, $\text{Al}_2\text{O}_3\text{-AlN}$). Эксплуатационные испытания инструмента с ПСТМ на основе cBN с покрытием AlN-Ti(Cr)B_2 твердостью $\text{HV}_{50} = 22,2\text{ ГПа}$ (в 1,8 раза твердости основы!), при точении закаленной стали показали снижение интенсивности изнашивания инструмента.

Подобный подход весьма перспективен для инструментов, используемых в процессах финишной обработки, а основное направление дальнейших исследований должно быть направлено на созданием химически стабильных при температурах более $1300\text{ }^\circ\text{C}$ систем, содержащих SiC и AlN .

На основе большого количества исследований механизма влияния различных покрытий на закономерности работоспособности инструмента с ПСТМ на основе cBN , можно выделить несколько взаимосвязанных подходов, являющихся теоретическим обоснованием для создания перспективных систем покрытий: – выбор структурных составляющих покрытия, которые в процессе обработки резанием на воздухе обеспечивают образование на рабочих поверхностях инструмента высокотемпературных полиоксидных трибопленок, играющих роль твердой смазки, что эффективно снижает интенсивность изнашивания инструмента; – введение в состав покрытия соединений, являющихся ингибиторами реакций химического взаимодействия, что позволит сдвинуть начало активного химического взаимодействия в зоне обработки в диапазон более высоких скоростей резания; – снижение коэффициента трения и контактных нагрузок на площадках контакта за счет твердых смазок и приработочных слоев покрытия; – обеспечение требуемого структурного состояния (аморфно-кристаллические либо наноструктурированные) покрытия.

Рассмотренный системный подход предопределяет необходимость проведения комплекса взаимосвязанных исследований по изучению и моделированию напряженного состояния покрытий и всего инструмента с покрытиями при различных видах эксплуатационного нагружения. Его можно рассматривать как идеологическую основу для синтеза системы обеспечения работоспособности инструмента с покрытием, исходя из представлений об архитектуре и свойствах поверхностного слоя, направленно формируемых в зависимости от условий эксплуатационного нагружения с целью повышения самоорганизации системы.

Выводы. Выполненный анализ показал значительные резервы в повышении производительности финишной лезвийной обработки. Увеличение подачи за счет реализации высоких потенциальных возможностей схемы брешущего резания обеспечивает получение обработанной поверхности с низкой шероховатостью при очень высокой производительности процесса обработки. Применение инструментов, оснащенных рабочей частью из композитов, разработанных с учетом особенностей явлений, протекающих в зоне резания, использование режущих инструментов со специальными защитными покрытиями обеспечивает возможность выполнения финишной лезвийной обработки с высокой скоростью резания.

Знание основных закономерностей процессов, имеющих место в зоне обработки, с учетом принципов технологического обеспечения качества и технологической наследственности, позволяет создавать высокопроизводительные технологии обработки изделий из современных конструкционных материалов, формировать в их поверхностном слое требуемое состояние, обеспечивая требуемые эксплуатационные свойства. Для этого, прежде всего, нужно рассматривать проблемы совершенствования процессов механической обработки и создания новых режущих инструментов как актуальные задачи современного материаловедения.

Список использованной литературы:

1. Oxide scales formation in nano-crystalline TiAlCrSiYN PVD coatings at elevated temperature / G.K. Dosbaeva, S.C. Veldhuis, K. Yamamoto and other // *Int. J. Refract. Met. Hard Mater.* – 2010. – Vol. 28, № 1. – Pp. 133–141.
2. Franz R. Vanadium containing self-adaptive low-friction hard coatings for high-temperature applications: a review / R.Franz, C.Mitterer // *Surf. Coat. Technol.* – 2013. – Vol. 228, № 7. – Pp. 1–13.
3. Special Features of the Applications of Cutting Tools from Polycrystalline Cubic Boron Nitride with Protective Coatings / S.A. Klimenko, S.An. Klimenko, A.S. Manokhin, V.M. Beresnev // *Journal of Superhard Materials.* – 2017. – Vol. 39, № 4. – Pp. 88–100.
4. Formation of tribofilm in the surface layer of the Al–Ti–Cr–N–B magnetron coating on born nitride during hardened steel turning / I.A. Podchernyaeva, S.A. Klimenko, V.M. Beresnev and other // *Powder Metallurgy and Metal Ceramics.* – 2015. – Vol. 54, № 3/4. – Pp. 140–150.
5. Вакуумно-дуговые устройства и покрытия / А.А. Андреев, Л.П. Саблев, В.М. Шулаев, С.Н. Григорьев. – Харьков : ННЦ ХФТИ, 2005. – 236 с.
6. Бобров В.Ф. Влияние угла наклона главной режущей кромки инструмента на процесс резания металлов / В.Ф. Бобров. – М. : Машиностроение, 1962. – 149 с.
7. Григорьев С.Н. Технологические методы повышения износостойкости режущего инструмента / С.Н. Григорьев, В.П. Табаков, М.А. Волосова. – Старый Оскол : ТНТ, 2011. – 379 с.
8. Инструменты из сверхтвердых материалов / под ред. Н.В. Новикова, С.А. Клименко. – М. : Машиностроение, 2014. – 608 с.
9. Исаев А.И. Процесс образования поверхностного слоя при обработке металлов резанием / А.И. Исаев. – М. : Машгиз, 1950. – 357 с.
10. Клименко С.А. Повышение эффективности процесса «брюющего» точения / С.А. Клименко, А.С. Манохин // *Вісник Національного технічного університету «ХПІ»*. Серія : Технології в машинобудуванні : зб. наук. праць. – Харків : НТУ «ХПІ», 2016. – № 5 (1177). – С. 61–66.
11. Теоретическое исследование температуры на контактом участке инструмента из ПКНБ / С.А. Клименко, С.Ан. Клименко, М.Ю. Копейкина, А.С. Манохин // *Вісник Національного технічного університету України «КПІ»*. Серія : Машинобудування. – 2016. – Вип. 77. – С. 50–54.
12. Клименко С.Ан. Підвищення стійкості інструментів із полікристалічного кубічного нітриду бору при точінні загартованих сталей застосуванням покриття : автореф. дис. ... канд. техн. наук / С.Ан. Клименко. – К. : ІНМ ім. В.М. Бакуля НАН України, 2015. – 20 с.
13. Копейкіна М.Ю. Підвищення зносостійкості лезового інструменту з ПНТМ на основі КНБ при високошвидкісному точінні важкооброблюваних сплавів : автореф. дис. ... канд. техн. наук / М.Ю. Копейкіна. – К. : ІНМ ім. В.М. Бакуля НАН України, 2008. – 20 с.
14. Ляшенко Б.А. Дискретное модифицирование поверхностного слоя деталей машин и инструментов / Б.А. Ляшенко, Н.В. Новиков, С.А. Клименко. – К. : ИСМ им. В.Н. Бакуля НАН Украины, 2017. – 264 с.
15. Сверхтвердые материалы. Получение и применение : в 6-ти т. / под общ. ред. Н.В. Новикова. Т. 5 : Обработка материалов лезвийным инструментом / под ред. С.А. Клименко. – К. : ИСМ им. В.Н. Бакуля, ИПЦ «АЛКОН» НАНУ, 2006. – 316 с.
16. Сорока Е.Б. Системный подход к обеспечению работоспособности деталей с покрытиями / Е.Б. Сорока, С.А. Клименко, М.Ю. Копейкина // *Високі технології в машинобудуванні : зб. наук. праць НТУ «ХПІ»*. – Харків : НТУ «ХПІ», 2009. – Вип. 2 (19). – С. 167–174.
17. Ткач М.С. Основной закон развития технических систем / М.С. Ткач [Электронный ресурс]. – Режим доступа : <http://sigmac.dp.ua/user/TRIZ.nsf/pages/L0000191>.

References:

1. Dosbaeva, G.K., Veldhuis, S.C., Yamamoto, K. and others (2010), «Oxide scales formation in nano-crystalline TiAlCrSiYN PVD coatings at elevated temperature», *Int. J. Refract. Met. Hard Mater.*, Vol. 28, No. 1, pp. 133–141.
2. Franz, R. and Mitterer, C. (2013), «Vanadium containing self-adaptive low-friction hard coatings for high-temperature applications: a review», *Surf. Coat. Technol.*, Vol. 228, No. 7, pp. 1–13.
3. Klimenko, S.A., Klimenko, S.An., Manokhin, A.S. and Beresnev, V.M. (2017), «Special Features of the Applications of Cutting Tools from Polycrystalline Cubic Boron Nitride with Protective Coatings», *Journal of Superhard Materials*, Vol. 39, No. 4, pp. 88–100.
4. Podchernyaeva, I.A., Klimenko, S.A., Beresnev, V.M. and others (2015), «Formation of tribofilm in the surface layer of the Al–Ti–Cr–N–B magnetron coating on born nitride during hardened steel turning», *Powder Metallurgy and Metal Ceramics*, Vol. 54, No. 3–4, pp. 140–150.
5. Andreev, A.A., Sablev, L.P., Shulaev, V.M. and Grigor'ev, S.N. (2005), *Vakuumno-dugovye ustroystva i pokrytiya*, NNTs KhFTI, Khar'kov, 236 p.
6. Bobrov, V.F. (1962), *Vliyanie ugla nakloina glavnoyi rezhustchei kromki instrumenta na protsess rezaniya metallov*, Mashinostroenie Publ., Moscow, 149 p.
7. Grigor'ev, S.N., Tabakov, V.P. and Volosova, M.A. (2011), *Tehnologicheskie metody povysheniya iznosostoykosti rezhustshego instrumenta*, TNT Publ., Staryi Oskol, 379 p.
8. Novikov, N.V. and Klimenko, S.A. (2014), *Instrumenty iz sverchtyverdykh materialov*, Mashinostroenie Publ., Moscow, 608 p.
9. Isaev, A.I. (1950), *Protsess obrasovaniya poverhnoznogo sloya pri obrabotke metallov rezaniem*, Mashgiz Publ., Moscow, 357 p.

10. Klimenko, S.A. and Manohin, A.S. (2016), «Povyshenie effektivnosti protsessa «breyustchego tocheniya», *Visnyk Natsionalnogo tehnicnogo universiteta «KhPI»*, Vol. 5, pp. 61–66.
11. Klimenko, S.A., Klimenko, S.An., Kopeykina, M.Yu. and Manohin, A.S. (2016), «Teoreticheskoe issledovanie temperaturaty na kontaktnom ychastke instrumenta iz PKNB», *Visnyk NTU Ukraine «KPI»*, Vol. 77, pp. 50–54.
12. Klimenko, S.An. (2015), «Pidvystchennya stikosti instrumentov iz polikpystalichnogo kubichnogo nitrydu boru pry tochini zagartovanyh stalei zastosovannyam pokryttiv», Abstract of dissertation, INM NAN Ukraine Publ., Kyiv, 20 p.
13. Kopeykina, M.Yu. (2008), «Pidvystchennya znosostiikosti lezovogo instrumentu iz PNTM na osnovi KNB pri vysokoshvidkismomu tochini vashkoobroblyvanych splaviv», Abstract of dissertation, INM NAN Ukraine Publ., Kyiv, 20 p.
14. Lyashenko, B.A., Novikov, N.V. and Klimenko, S.A. (2017), *Diskretnoe modifitsirovanie poverhnostnogo sloya detaley mashin i instrumentov*, ISM NAN Ukraine Publ., Kiev, 264 p.
15. Novikov, N.V. (ed.) (2006), *Sverhtverdye materialy. Poluchenie i primeneniye*, in 6 volumes, Vol. 5 «Obrabotka materialov lezviynym instrumentom», in Klimenko, S.A. (ed.), ISM im. V.N. Bakulja, IPC «ALKON» NANU, Kiev, 316 p.
16. Soroka, E.B., Klimenko, S.A. and Kopeykina, M.Yu. (2009), «Sisnemnyi podhod k obespecheniyu rabotosposobnosti detaley s pokrytuyami», zb. nauk. prats', *NTU «KhPI» Vysoki tehnologii v mashinobuduvanni*, Vol. 2, pp. 167–174.
17. Tkach, M.S., «Osnovnoy zakon razvitiya tehniceskikh system», available at: <http://sigmac.dp.ua/user/TRIZ.nsf/pages/L0000191>

Клименко Сергей Анатольевич – доктор технических наук, профессор, заместитель директора по научной работе Института сверхтвердых материалов им. В.Н. Бакуля НАН Украины.

Научные интересы:

- материаловедение сверхтвердых композитов;
- закономерности процесса резания инструментами из сверхтвердых материалов;
- состояние поверхностного слоя обработанных деталей.

E-mail: atmu@meta.ua.

Статья поступила в редакцию 04.09.2017.