

Ю.Г. Гуцаленко

## СИСТЕМНЫЙ ПОДХОД К СРАВНИТЕЛЬНОЙ ОЦЕНКЕ РАБОТОСПОСОБНОСТИ ИНСТРУМЕНТАЛЬНЫХ МАТЕРИАЛОВ ПО СТАНДАРТНЫМ РЕГЛАМЕНТАМ СТОЙКОСТНЫХ ИСПЫТАНИЙ

Рассматривается проблема сравнения эксплуатационных возможностей инструментальных материалов и режущих пластин из них. Принятая во внимание расширенная система критериев работоспособности включает скорость объемного съема, стойкость, рабочий путь резания, площадь обработанной поверхности, объемный съем. Предложена системная аналитическая модель и выполнен расчет для сверхтвердых композитов на основе кубического нитрида бора в стандартных неперетачиваемых режущих пластинах. Расчет выполнен в системе условий и нормативов стандартных стойкостных испытаний. Показан пример развития аналитической модели применительно к оценке рейтинга работоспособности перетачиваемых режущих пластин в условиях неоднозначности допустимого износа.

**Ключевые слова:** кубический нитрид бора, сверхтвердые композиты, режущие пластины, стойкостные испытания, работоспособность, рабочий путь резания, объемный съем, сравнительная оценка.

**Введение и постановка задачи.** Информация о сравнительной работоспособности инструментальных материалов, особенно в дорогостоящих альтернативах, к которым относятся прежде всего сверхтвердые, важна в принятии экономически обоснованных решений организационно-технологической подготовки производства.

В исследовании [1] базой исходных данных для аналитического расчета такой информации применительно к инструментальным композитам на основе кубического нитрида бора используется стандартный регламент и нормативы стойкостных испытаний сменных режущих пластин из сверхтвердых материалов [2]. Эта работа использует исходные данные (см. табл. 1) и методическую логику [1], с развитием в полной иерархической системе ресурсных показателей, рассматриваемых научной школой МГТУ им. Н. Э. Баумана [3], включающей рабочий путь резания, площадь обработанной поверхности и объемный съем. Исследование [1] опирается на использование только последнего из них.

**Основные результаты.** Выполненные расчеты охватывают группу инструментальных композитов на основе кубического нитрида бора, составившую предмет рассмотрения действующим в Украине межгосударственным стандартом [2].

Эта группа включает следующие композиты: 01 (K01 – эльбор-Р) [4], 02 (белбор) [5], 05 (K05ИТ) [4], 06 [6], 10Д (K10Д – двухслойные пластины: гексанит-Р с подложкой из безвольфрамового сплава) [4], 11 (киборит) [6, 7], Томал-10 [8].

Результаты расчетов и используемые в их производстве базы данных систематизированы в табл. 1.

Округление расчетных данных, где оно произведено в реляционном представлении, выполнено отбрасыванием остатка.

В табл. 2 приведены расчетные зависимости, использующие унифицированную систему идентификаторов и тут же сопровождаемые необходимыми понятийными пояснениями.

Таблица 1 – Исходные и расчетные данные

Показатель	Марка композита					
	01, 02	05	06	10Д	11	Томал-10
Исходные данные [2]						
Скорость ( $v$ ), м/мин	75			60	110	90
Подача ( $S_o$ ), м/об, $\cdot 10^{-3}$ .	0,20	0,15	0,10	0,07	0,10	
Глубина ( $t$ ), м, $\cdot 10^{-3}$ .	0,8	2,0	0,5	0,4	0,5	0,8

© Ю.Г. Гуцаленко, 2015

Показатель	Марка композита					
	01, 02	05	06	10Д	11	Томал-10
Средняя стойкость ( $T_{cp}$ ), мин	20	15	40	30	60	50
95-процентная стойкость ( $T_{95\%}$ ), мин	8	6	16	12	24	20
Расчетные данные						
$k_T = k_{T_{cp}} = k_{T_{95\%}}$	0,33	0,25	0,66	0,5	1	0,83
$Q = v S_o t$ , $М^3/мин, \cdot 10^{-6}$ .	12	22,5	3,75	1,68	5,5	9
$k_Q$	0,53	1	0,16	0,07	0,24	0,4
$L_{cp} = v T_{cp}$ , м	1500	1125	3000	1800	6600	4500
$L_{95\%} = v T_{95\%}$ , м	600	450	1200	720	2640	1800
$k_{v(T)}$	0,68			0,54	1	0,81
$k_{T(v)}$	0,33	0,25	0,66	0,5	1	0,83
$k_L = k_{L_{cp}} = k_{L_{95\%}}$	0,22	0,17	0,45	0,27	1	0,68
$F_{cp} = S_o v T_{cp}$ , $М^2, \cdot 10^{-4}$	3000	1687,5	3000	1260	6600	4500
$F_{95\%} = S_o v T_{95\%}$ , $М^2, \cdot 10^{-4}$	1200	675	1200	504	2640	1800
$k_{S_o(S_o \cdot L)}$	2	1,5	1	0,7	1	1
$k_{L(S_o \cdot L)}$	0,22	0,17	0,45	0,27	1	0,68
$k_F = k_{F_{cp}} = k_{F_{95\%}}$	0,45	0,25	0,45	0,19	1	0,68
$W_{cp} = Q \cdot T_{cp}$ , $М^3, \cdot 10^{-6}$ .	240	337,5	150	50,4	330	450
$W_{95\%} = Q \cdot T_{95\%}$ , $М^3, \cdot 10^{-6}$ .	96	135	60	20	132	180
$k_{Q(Q \cdot T)}$	1,33	2,5	0,41	0,18	0,61	1
$k_{T(Q \cdot T)}$	0,4	0,3	0,8	0,6	1,2	1
$k_W = k_{W_{cp}} = k_{W_{95\%}}$	0,53	0,75	0,33	0,11	0,73	1

Выражения вида  $k_{X(Y)}$  в табл. 1 и 2 объединяет ряд  $I = 1, \dots, i, \dots, I$  относительных оценок  $k_{X_i(Y)} = X_i / X_j \in Y_j = Y_{opt}$ , где  $X$  – элементарный параметр или элементарный комплекс параметров (например, произведение двух или нескольких параметров),  $Y$  – критериальная функция,  $\in$  – знак принадлежности. Частные случаи  $k_{X(Y)} \equiv k_X$ : 1) если  $X \equiv Y$ ; 2) если  $X_j \in Y_j = Y_{opt}$ , и притом  $X_j \equiv X_{opt}$ . В рассматриваемой задаче  $opt \equiv max$  для всех  $Y$ , каковыми по табл. 1 и 2 являются  $Q, T, L, F, W$  и, в последующем рассмотрении перетачиваемых режущих пластин, суммарный съём  $V$  с учетом переточек.

В общем случае рассмотрения относительной работоспособности по элементарным оценкам ( $k_T, k_Q$ ) и комплексным или, в контексте [3], ресурсным ( $k_L, k_F, k_W$ ), как это представлено в табл. 1, предпочтение следует отдавать оценке по  $k_W$ , поскольку она входящей в ее состав структурой аналитического отобра-

жения объемного съема ( $М^3$ ) учитывает наибольшее число независимых факторов влияния и поэтому является наивысшей по значимости в иерархии ресурсных, по сравнению с оперирующей площадями ( $М^2$ ) оценкой  $k_F$  и оперирующей траекториями (м) оценкой  $k_L$ .

Максимальный съём обрабатываемого материала за время рабочей жизни режущей пластины из сверхтвёрдого материала как рейтинговый критерий – это одновременно и минимизация затрат в расчете на объемную единицу снимаемого припуска при формообразовании изделий, максимальное использование уникальных режущих свойств сверхтвёрдых материалов, инструментальных композитов и режущих пластин на их основе.

Как следует из табл. 1, киборит и Томал-10 получили две первые позиции по всем относительным характеристикам, опирающимся на независимые

Таблица 2 – Основные понятия и аналитические отображения

Символ	Понятийное содержание	Аналитическое выражение
$k_T$	Относительная стойкость, средняя, $T = T_{cp}$ , или 95-процентная, $T = T_{95\%}$ в системе норм [2] $T_{95\%i} = 0,4T_{cp i}$ ( $T_{95\%i} = 0,4T_{cp i}$ ) и $k_{T_{cp}} = k_{T_{95\%}} = k_T$	$k_{Ti} = (T_{cp})_i / (T_{cp})_{max} = (T_{95\%})_i / (T_{95\%})_{max}$
$Q$	Производительность объемного съема, $м^3/мин$	$Q = v S_o t$
$k_Q$	Относительная производительность объемного съема	$k_{Qi} = (v S_o t)_i / (v S_o t)_{max}$
$L$	Рабочий путь резания за нормативную стойкость, среднюю, $T = T_{cp}$ , или 95-процентную, $T = T_{95\%}$ , $м$	$L = v T$
$k_L$	Относительный рабочий путь резания за нормативную стойкость, среднюю, $T = T_{cp}$ , или 95-процентную, $T = T_{95\%}$ в общем случае непостоянства нормы стойкости $T_i$	$k_{Li} = (v T)_i / (v T)_{max}$ или $k_L = k_{v(v \cdot T)} \cdot k_{T(v \cdot T)}$ , где $k_{v(v \cdot T)i} = v_i / v(v \cdot T)_{max}$ и $k_{T(v \cdot T)i} = T_i / T(v \cdot T)_{max}$
$F$	Площадь поверхности, обработанной за нормативную стойкость, среднюю, $T = T_{cp}$ , или 95-процентную, $T = T_{95\%}$ , $м^2$	$F = S_o \cdot v T$
$k_F$	Относительная площадь поверхности, обработанной за нормативную стойкость, среднюю, $T = T_{cp}$ , или 95-процентную, $T = T_{95\%}$ в общем случае непостоянства нормы стойкости $T_i$ .	$k_{Fi} = (S_o \cdot v T)_i / (S_o \cdot v T)_{max} = (S_o L)_i / (S_o L)_{max}$ или $k_F = k_{S_o(S_o \cdot L)} \cdot k_{L(S_o \cdot L)}$ , где $k_{S_o(S_o \cdot L)i} = S_{oi} / S_{o(S_o \cdot L)max}$ и $k_{L(S_o \cdot L)i} = L_i / L(S_o \cdot L)_{max}$
$W$	Съем за нормативный период стойкости, средней, $T = T_{cp}$ , или 95-процентной, $T = T_{95\%}$ в общем случае непостоянства нормы стойкости $T_i$ , $м^3$	$W = v S_o t T$
$k_W$	Относительный съем за нормативный период стойкости, средней, $T = T_{cp}$ , или 95-процентной, $T = T_{95\%}$ ( $n_o = const$ )	$k_{Wi} = (v S_o t T)_i / (v S_o t T)_{max}$ или $k_W = k_{Q(Q \cdot T)} \cdot k_{T(Q \cdot T)}$ , где $k_{Q(Q \cdot T)i} = Q_i / Q(Q \cdot T)_{max}$ и $k_{T(Q \cdot T)i} = T_i / T(Q \cdot T)_{max}$

оценки ресурса инструмента по [3], и при этом заметно выделяются по уровню оценок на фоне остальных композитов: по данным табл. 1 средняя их относительных оценок  $k_L$ ,  $k_F$  и  $k_W$  (0,85) значительно превосходит среднюю оценок остальной четверки композитов (0,40), регламент стойкостных испытаний которых по [2] также исходит из безударного характера работы (см. табл. 1).

По данным табл. 1 рейтинговая линейка по  $k_W$  представляет следующую последовательность (в порядке убывания расчетных значений рейтинговой оценки): композит Томал-10 (1), композит 05 (0,75), композит 11 (0,73), композиты 01 и 02 (0,53), композит 06 (0,33), композит 10Д (0,11).

Визуализация расчетных данных по всем относительным оценкам ( $k_T$ ,  $k_Q$ ,  $k_L$ ,  $k_F$  и  $k_W$ ) в рейтинговой линейке по  $k_W$ , в выполняемом исследовании определенной иерархически предпочтительной, приведена на рис. 1.

Полученные из расчетной модели  $k_W$  результаты после ранжирования (рис. 1, д) отражают функциональный рейтинг рассматриваемых нитридных композитов по критерию максимума ожидаемого съема рекомендуемой к обработке стали. Визуализация на рис. 1 результатов расчетов  $k_Q$

(рис. 1, а) и  $k_T$  (рис. 1, б) в рейтинговой последовательности композитов, определенной расчетом  $k_W$  (рис. 1, д), показывает неочевидность следования наиболее значимой рейтинговой оценки ( $k_W$ ) и других ресурсных комплексов ( $k_L$ ,  $k_F$ ) из элементарных рейтингов  $k_Q$  и (или)  $k_T$ .

Объективность обращения к избранным в рассмотренной задаче относительным оценкам в этом и подобных рассмотрениях возрастает с унификацией критерия и допустимой величины износа для пластин из разных материалов.

Регламент [2] таким унифицированным критерием во всех испытаниях определяет износ пластин по задней поверхности. Допустимая величина износа по задней поверхности ( $h_3$ ) в стойкостных испытаниях определяется [2] равной,  $h_3 = 0,4$  мм, вне зависимости от марки композита, угла при вершине пластины и предназначения для работы в автоматических линиях, станках с ЧПУ и ГПС, как это имеет место в регламентировании [2] контроля пластин после испытания их режущих свойств.

**Обсуждение и перспективы развития методического подхода.** Разработанная система аналитических моделей в части отображений относительных оценок работоспособности инструмен-

тальных материалов и инструментов из них высших порядков ( $k_L$ ,  $k_F$  и  $k_W$ ) представляет собой единую системную аналитическую модель, оперирующую с отношениями абсолютных значений характеристик работоспособности, описываемых произведением функциональной скорости (соответственно  $m$ ,  $m^2$  и  $m^3$  за единицу времени) на нормативную стойкость.

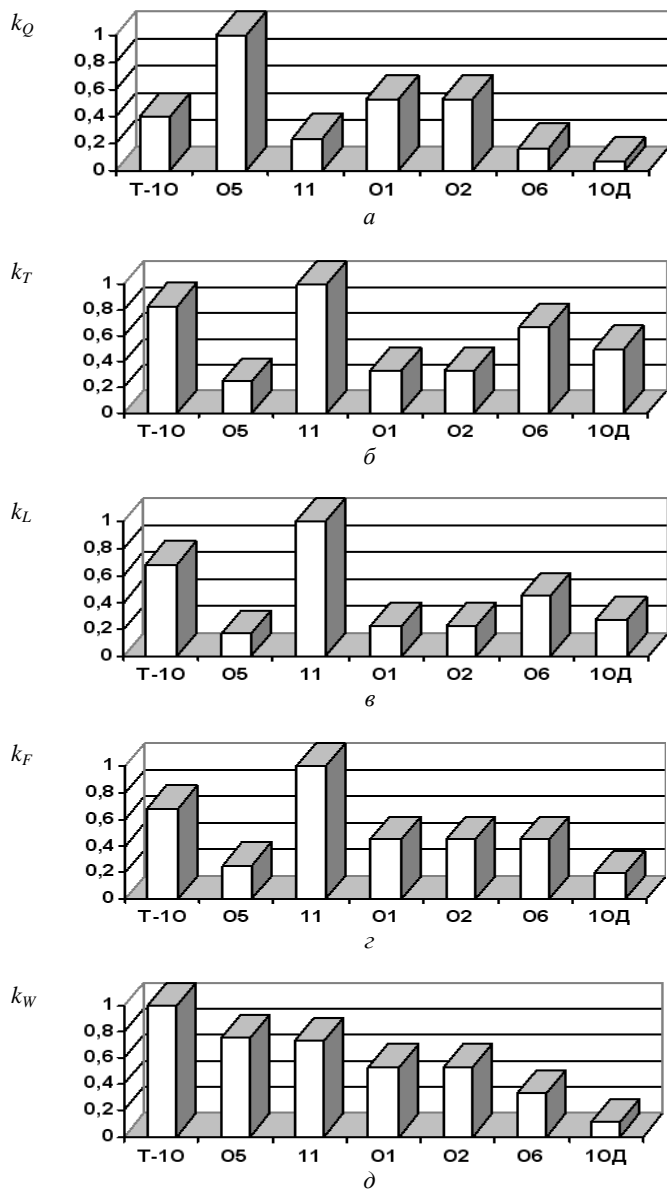


Рис. 1 – Относительные показатели работоспособности сверхтвердых композитов на основе кубического нитрида бора: а – по производительности ( $k_Q$ ); б – по стойкости ( $k_T$ ), в – по пути резания ( $k_L$ ); г – по площади обработанной поверхности ( $k_F$ ); д – по объемному съему ( $k_W$ ) в рейтинговой линейке относительно объема съема (идентификатором Т-10 на рисунке обозначен композит Томал-10).

Предложенный подход является открытым для дальнейшего совершенствования, имеет перспективу развития на своей собственной аналитической основе. Причем как в направлении создания аналитического продукта повышенного уровня обобщения, так и в направлении разработки частных ана-

литических решений. Поясним это методическим примером адаптации аналитической расчетной схемы применительно к перетачиваемым режущим пластинам.

Единственность критерия и допустимой величины износа в соответствующей определению интегральной рейтинговой оценки  $k_W$  практике, как это имеет место в представленном исследовании, означает, что физический смысл этой вероятностной оценки заключается в отображении математического ожидания относительного съема данной пластиной в сопоставлении с наивысшим результатом среди всех оцениваемых не только за период стойкости, но, в рассмотрении разработанной расчетной модели в системе соответствующих допущений и ограничений применительно к перетачиваемым пластинам, и за весь ресурс работоспособности среди пластин с одинаковым исходным припуском  $\delta$  на переточки или неперетачиваемых.

Эти допущения и ограничения в наиболее общем случае должны исходить из организации производства переточек в системе неравных предельных значений допустимого износа для ранжируемых объектов, причем с его заданием и переточкой либо по задней, либо по передней поверхности, а также из допустимости оценки съема  $W$  обрабатываемого материала за период стойкости  $T$  по каждому из используемых [2] стойкостных нормативов (Тср. и Т95%).

Систему достаточных допущений в общем случае может образовывать следующая триада: 1) зависимость критериального износа (т. е. по поверхности его нормирования) от времени резания имеет непрерывный линейный характер; 2) характер изнашивания режущей пластины в направлении нормали к перешлифовываемой поверхности идентичен характеру развития критериального износа; 3) коэффициенты  $\zeta_i$  пропорциональности между величинами износа в направлении нормали к перешлифовываемой поверхности и критериального износа для всех пластин в ранжируемой группировке известны. Если перешлифовываемая поверхность и поверхность определения критериального износа взаимно перпендикулярны, то  $\zeta_i$  вырождается в  $\zeta_i = 1$ .

Сформулированная система допущений позволяет рассчитывать интегральную рейтинговую оценку  $k_V$  относительного съема за нормативный ресурс режущей пластины, являющуюся оценкой более высокого порядка, чем  $k_W$ , а также более точной при неоднозначном задании критерия износа и его величины, как это имеет место, например, в оговоренных стандартом [2] условиях испытаний пластин на режущую способность, согласно которым норма  $h_3$ , в зависимости от марки композита и угла  $\epsilon_T$  при вершине пластины, варьируется от  $h_3 = 0,10$  мм (композит 11,  $\epsilon_T \geq 90^\circ$ ) до  $h_3 = 0,15$  мм (Томал-10, для всех  $\epsilon_T$ ).

В контексте вышеизложенного, при  $\delta = \text{const}$  у всех ранжируемых режущих пластин в выполненном представленным исследованием рассмотрении

по материалам [2] для стойкостных испытаний,  $kV = kW$

Применительно, например, к некоторой виртуальной задаче с группировкой режущих пластин в аналогичных [2] и рассмотренных здесь условиях стойкостных испытаний, но с переменными  $h_{z1}$  и  $\zeta_1$ ; постоянными количеством ( $n$ ) рабочих позиций (например, для многогранных определяемому количеству рабочих вершин или боковых граней, отражаемым в наименовании пластины); припуском ( $\delta$ ) на перешлифовку (например, по задней грани); передним ( $\gamma$ ) и задним ( $\alpha$ ) углами режущего клина (например, нулевыми): минуя промежуточные выкладки, окончательно имеем

$$kVi = (v \cdot S_o \cdot t \cdot T \cdot [\delta / (\zeta \cdot h_{z.})])_i / (v \cdot S_o \cdot t \cdot T \cdot [\delta / (\zeta \cdot h_{z.})])_{\max},$$

или

$$kV = kQ(QTN) \cdot kT(QTN) \cdot kN(QTN),$$

где

$$kNi = [\delta / (\zeta \cdot h_{z.})]_i(QTN) / [\delta / (\zeta \cdot h_{z.})]_{\max}(QTN)$$

– относительное число переточек за нормативный ресурс режущей пластины.

Здесь полезно заметить, что определяющая  $kN$  целая часть  $[\delta / (\zeta \cdot h_{z.})]$  вещественных чисел  $\delta / (\zeta \cdot h_{z.})$ , в общем случае не кратности числителя знаменателю, равна числу перешлифовок перетачиваемой режущей пластины за время ее успешной рабочей жизни, т. е. в отсутствие превышающих нормативный износ сколов и выкрашиваний.

И т. д., в т. ч. с инверсией поверхности перешлифовки на переднюю; переменными  $\delta_1$  и  $\zeta_1$ ; ненулевыми  $\gamma$  и  $\alpha$ .

**Заключение.** Таким образом, разработанный подход к рейтинговой оценке работоспособности рабочей части лезвийных инструментов может использоваться применительно к различным группировкам в иерархии инструментальных материалов, в том числе используемым в виде перетачиваемых режущих пластин.

Подход аналитически реализован и получил расчетную апробацию с опорой на информационный базис стандартной методики стойкостных испытаний режущих пластин из сверхтвердых материалов. В результате расчетов определены рейтинги работоспособности в группе композитов на основе кубического нитрида бора (композиты 01, 02, 05, 06,

10Д, 11, Томал-10). Полученные рейтинговые оценки могут использоваться в планировании и подготовке научно-исследовательской и производственной практики.

**Список литературы:** 1. Гуцаленко, Ю. Г. Аналитическая модель и расчет рейтинговой оценки нитридных сверхтвердых композитов / Ю. Г. Гуцаленко // Вісн. Нац. техн. ун-ту "Харк. політехн. ін-т" : Зб. наук. пр. Темат. вип. : Технології в машинобудуванні. – Х. : НТУ «ХПІ», 2014. – № 42. – С. 192-196. 2. Пластины режущие сменные из сверхтвердых материалов. Технические условия : ГОСТ 28762-90 [Межгос. стандарт]. Введ. 1991-07-01. – Переизд. – М. : Стандартинформ, 2005. – 25 с. 3. Грановский, Г. И. Резание металлов: Учебник для машиностр. и приборостр. спец. вузов / Г. И. Грановский, В. Г. Грановский. – М. : Высш. шк., 1985. – 304 с. 4. ЗАО «Завод «Композит»»: [Официальный сайт; Санкт-Петербург, Россия]. – Режим доступа : <http://www.kompozit.spb.ru>. – Дата обращения : 29 августа 2014. 5. Институт физики твердого тела и полупроводников НАН РБ : [Официальный сайт; Минск, Беларусь]. – Режим доступа : <http://www.iftp.bas-net.by>. – Дата обращения : 29 августа 2014. 6. Научно-техническая фирма ООО «КНБ» : [Официальный сайт; Москва, Россия]. – Режим доступа : <http://www.knb.su>. – Дата обращения : 29 августа 2014. 7. Научно-технологический алмазный концерн «АЛКОН» : [Официальный сайт; Киев, Украина]. – Режим доступа : <http://www.alcon.com.ua>. – Дата обращения : 29 августа 2014. 8. ОАО «Московское производственное объединение по выпуску алмазного инструмента» : [Официальный сайт; пгт Томилино, Люберецкий район, Московская область, Россия]. – Режим доступа : <http://www.tomaltools.ru>. – Дата обращения : 29 августа 2014.

**Bibliography (transliterated):** 1. Gutsalenko, Yu. G. "Analiticheskaja model' i raschet rejtingovoj ocenki nitridbornyh sverhtverdyh kompozitov". *Visnyk NTU "KhPI"*. Kharkov. No. 42. 2014. pp.192–196. Print. 2. *Plastiny rezhushhie smennye iz sverhtverdyh materialov. Tehnicheskie uslovija*. GOST 28762-90. Moscow, Standartinform, 2005, 25 p. Reprint. 3. Granovskij, G. I., and V. G. Granovskij. *Rezanie metallov*. Vysshaja shkola, 1985. 304 p. Print. 4. *Zakrytoe akcionernoe obshhestvo Zavod Kompozit*. Zavod Kompozit, Closed Joint Stock Company, Sankt-Peterburg, Russia. 2014. Web. August 30, 2014. <<http://www.kompozit.spb.ru>>. 5. *Nacional'naja akademija nauk Belarusi. Institut fiziki tverdogo tela i poluprovodnikov*. Joint Institute for Solid State Physics and Semiconductors, National Academy of Sciences of Belarus, Minsk, Belarus', 2014. Web. August 30, 2014. <<http://www.iftp.bas-net.by>>. 6. *Nauchno-tehnicheskaja firma OOO KNB*. KNB, Co.Ltd, Moscow, Russia. Web. August 29, 2014. <<http://www.knb.su>>. 7. "ALKON diamond concern". *V. Bakul Institute for Superhard Materials of the National Academy of Sciences of Ukraine*. V. Bakul Institute for Superhard Materials of the National Academy of Sciences of Ukraine. Kiev, Ukraine. Web. August 29, 2014. <<http://www.alcon.com.ua>>. 8. *Joint Stock Company – Moscow Industrial Union for Diamond Tools Production*. Moscow Industrial Union for Diamond Tools Production, Joint Stock Company, Tomilino, Ljuberetsky area, Moscow Region, Russia. Web. August 29, 2014. <<http://www.tomaltools.ru>>.

Поступила (received) 24.03.2015

Гуцаленко Юрий Григорьевич – старший научный сотрудник, НТУ «ХПИ», тел.: (057)-707-61-85, e-mail: [gutsalenko@kpi.kharkov.ua](mailto:gutsalenko@kpi.kharkov.ua)