

**М. Н. Шейко\*, А. П. Максименко, П. И. Бологов**

Институт сверхтвердых материалов им. В. Н. Бакуля

НАН Украины

\*max-kiiev@i.ua

**Алмазно-гальваническое покрытие  
с протекцией алмазным микропорошком  
в правящем инструменте. Сообщение 2.  
Работоспособность инструмента**

*Приведен сравнительный анализ результатов стойкостных испытаний правящих роликов с традиционным алмазно-гальваническим покрытием (АГП) и АГП с протекцией. Показано, что протекция АГП алмазным порошком повышает период стойкости правящего инструмента, изготовленного методом гальванопластики, на 90 %, а период до полного разрушения АГП – на 125 %. Теоретически отслежена динамика изменения глубины заделки в связке алмазных зерен, установлена связь этой величины с характеристиками износа связки и алмазных зерен.*

**Ключевые слова:** алмазно-гальваническое покрытие, протекция алмазным микропорошком, правящий инструмент, период стойкости.

В предыдущем сообщении [1] был предложен метод протекции алмазно-гальванического покрытия (АГП) алмазным микропорошком и рассчитан режим осаждения никеля при формировании такого модернизированного АГП методом гальванопластики. Этот метод был реализован в экспериментальных правящих роликах прямого профиля АС200Т 400/315. В качестве контрольных экземпляров были изготовлены ролики с точно такими же параметрами, но без протекции. Настоящее сообщение посвящено стойкостным испытаниям и сравнительному анализу роликов с обычным АГП и с АГП с протекцией.

Испытания проводили по методике квазиврезной правки [2, 3] абразивных кругов на специальном стенде на базе круглошлифовального станка ЗБ151 с автономным приводом правящего ролика. Для обеспечения таких условий работы алмазного слоя ролика, как при врезной правке, осевая подача  $S$  была, в соответствии с [2, 3], назначена равной длине  $L$  испытываемого участка АГП. Скорости абразивного круга (29 м/с) и ролика (14,6 м/с) соответствовали режимам правки, применяемым в производственных условиях. Заправляли абразивные круги  $\varnothing 600 \times 63 \times 305$  марки 24А25СМ2К5 при осевой подаче  $S = 3,35$  мм/об ( $U = 61,8$  мм/с) и подаче на глубину  $t_0 = 0,01$  мм. Последняя гарантировала штатный уровень сил правки при оптимальном использовании времени эксперимента.

Стойкостные испытания проводили в одинаковых условиях для контрольного и усиленного роликов путем правки кругов на вышеотмеченных режимах. Периодически правку приостанавливали, испытываемый ролик снимали с установки и измеряли износ его АГП. В отличие от весового метода изме-

рения расхода алмазов, где учитывается вес и изношенной части алмазов, и целых вывалившихся из связки зерен, и, возможно, вес изношенной связки, в данном (метрическом) методе [4] отслеживали лишь абразивный износ алмазов, обуславливающий размерную стойкость роликов до момента вырывания зерен из связки, что для правящего инструмента недопустимо. Суть метода состояла в том, что рабочий профиль роликов содержал заниженную – в данном случае на 1 мм [1] – часть, служившую базой и не контактирующую с заправляемым кругом в процессе основной работы, а следовательно, не изнашиваемую (рис. 1, *а*). Относительно этой базы измеряли линейный износ  $\delta$  главной части профиля. В силу дискретности рабочей поверхности алмазного ролика линейный износ измеряли опосредовано. Роликом с текущим износом АГП по схеме врезной подачи заправляли сторонний абразивный круг, на который вследствие этого переносился профиль ролика. Сформированный на круге профиль, в свою очередь, посредством врезного шлифования переносили на пластинчатый свидетель. Высоту рабочего участка профиля над базой на пластинчатом свидетеле замеряли на микроскопе УИМ-21 с номинальной точностью  $\pm 2$  мкм. Отрицательное приращение этой высоты между двумя точками стойкостных испытаний интерпретировали как линейный износ АГП ролика за этот период. Линейный износ  $\delta$  сам по себе является важнейшим параметром, характеризующим размерную стойкость правящего инструмента, но традиционный удельный расход алмазов  $Q_{уд}$  легко пересчитывали по линейному износу по методике [4].

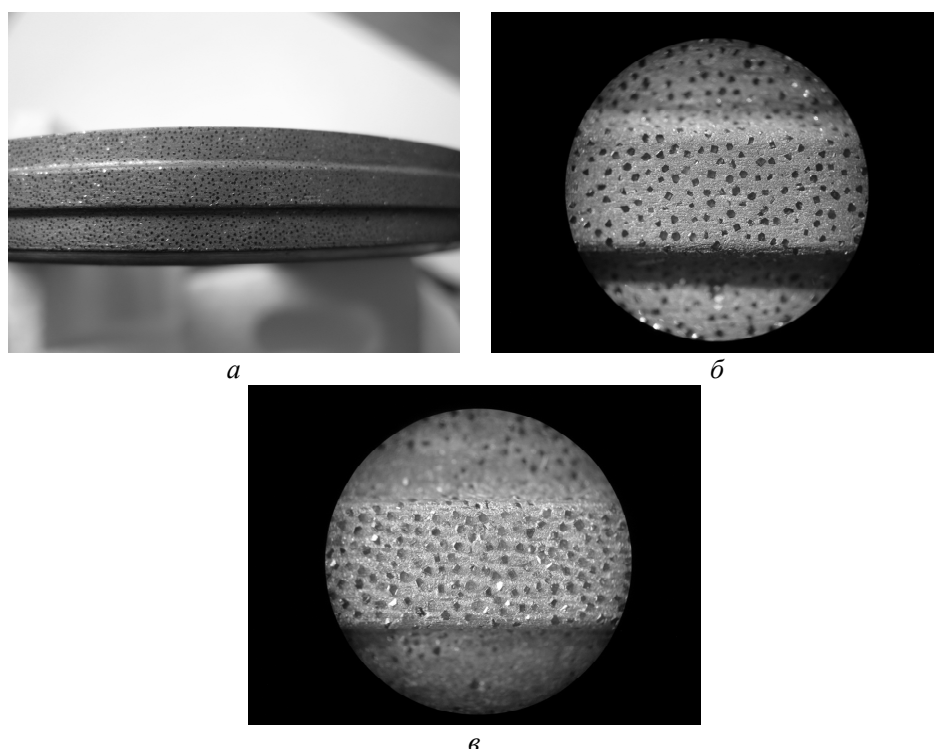


Рис. 1. Рабочая поверхность алмазного правящего ролика в плане: средняя выступающая часть как рабочая и две внешние заниженные как базовые (*а*), вскрытая рабочая поверхность (*б*), рабочая поверхность после диспергирования 1 у.е. абразивного материала (*в*).

Второй параметр износа АГП – удельный объем карманов в межзеренном пространстве  $\omega$ ,  $\text{мм}^3/\text{мм}^2$  – обуславливал степень заделки алмазных зерен в никелевой матрице роликов [5, 6]. В силу использования в современных правящих инструментах алмазных порошков высоких марок, как указано в [1], износ связки стал превалирующим фактором, определяющим стойкость этого инструмента.

И линейный износ, и удельный объем карманов устанавливали как функцию объема диспергированного материала заправляемых шлифовальных кругов. В силу того, что правку производили по квазиврезной схеме [2, 3], имитирующей врезную правку, значение имел объем, приведенный к единице длины рабочего профиля правящего инструмента. Это очевидно, ведь, скажем, два ролика, различающиеся по длине рабочего профиля в 2 раза, но во всем остальном – в том числе по режимам правки – идентичные, будут изнашиваться в одинаковом темпе, несмотря на то, что более широкий будет удалять в 2 раза больший объем. Следовательно, единица произведенной “работы”, адекватная условиям правки, – это приведенный объем диспергированного абразивного материала заправляемых кругов. Его размерность –  $\text{мм}^3/\text{мм}$ . Для наглядности были использованы условные единицы. В качестве одной условной единицы (у.е.) был взят объем стандартного абразивного круга  $\text{Ø} 600 \times 63 \times 305$ , приведенный к его высоте (63 мм), т. е. к длине рабочего профиля ролика, заправляющего его по врезной схеме:

$$1 \text{ у.е.} = \frac{\pi}{4} (600^2 - 305^2) \cdot 63 / 63 = 2,097 \cdot 10^5 \text{ мм}^3/\text{мм}. \quad (1)$$

Используемый метод квазиврезной правки позволяет не только имитировать врезную правку, но и экономить количество используемых в экспериментах кругов. Коэффициент использования круга, как показано в [2, 3], в данном случае, когда длина рабочего профиля  $L = 3,35$  мм, был равен

$$63 \text{ мм} / 3,35 \text{ мм} = 18,8. \quad (2)$$

Это означало, что диспергируя в эксперименте, скажем, 1/2 объема круга  $\text{Ø} 600 \times 63 \times 305$ , испытываемый ролик в производственных условиях удалял бы

$$\frac{1}{2} \cdot 1 \text{ у.е.} \cdot 18,8 = 9,4 \text{ у.е.},$$

т. е. полных – до посадки (!) – 9,4 круга  $\text{Ø} 600 \times 63 \times 305$ .

В результате испытаний ролика без протекции были получены следующие данные: как и ожидалось, с увеличением объема  $x$  диспергированного материала абразивных кругов удельный объем  $\omega$  карманов между алмазными зернами на рабочей поверхности ролика имел тенденцию к стабилизации (рис. 2, а) и описывался зависимостью

$$\omega = (118 - 79e^{-0,236x}) \cdot 10^{-3}. \quad (3)$$

Сравнивая последнее выражение с законом гидроабразивного износа [5, 6]

$$\omega(x) = \omega_{\max} - (\omega_{\max} - \omega_0)e^{-kx}, \quad (4)$$

получили значение начального удельного объема карманов  $\omega_0 = 39 \cdot 10^{-3} \text{ мм}^3/\text{мм}^2$ , предельного значения  $\omega_{\max} = 118 \cdot 10^{-3} \text{ мм}^3/\text{мм}^2$  и коэффициента, связанного с темпом износа связки  $k = 0,236 \text{ у.е.}^{-1}$ . Начальный объем  $\omega_0$  был обеспечен

предварительным вскрытием рабочей поверхности правящего инструмента сторонним абразивным кругом. Такая величина карманов (см. рис. 1, б) еще не являлась оптимальной для режущей способности ролика, но уже обеспечивала размещение шлама при правке и допустимый уровень сил резания.

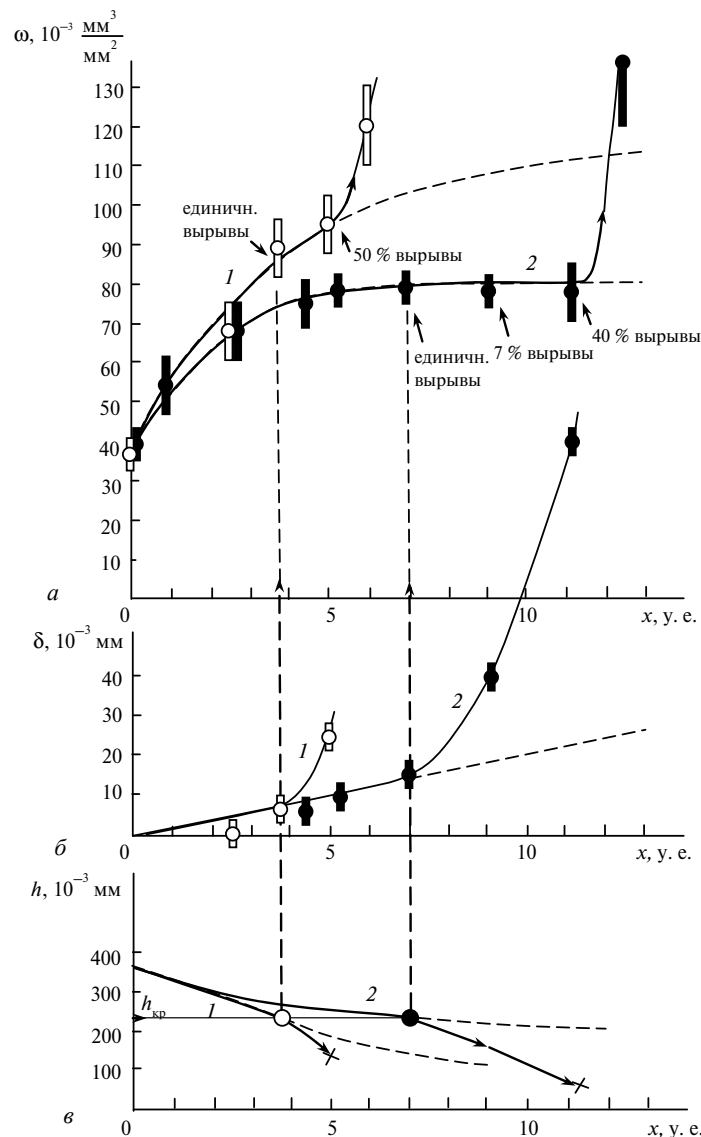


Рис. 2. Зависимость удельного объема карманов (а), линейного износа алмазного слоя (б) и средней глубины заделки алмазного зерна (в) в инструменте с АГП без протекции (1) и с протекцией (2) от объема  $x$  диспергированного материала.

По мере увеличения объема диспергированного материала абразивных кругов объем карманов рос (см. рис. 1, в), но темп износа связки замедлялся (см. рис. 2, а). Как видно на рис. 2, при диспергировании 3,7 у.е. удельный объем карманов  $\omega$  достиг значения  $85 \cdot 10^{-3} \frac{mm^3}{mm^2}$ , что оказалось критическим. На следующем этапе эксперимента, когда в сумме было диспергировано 5 у.е., рабочая поверхность ролика потеряла 50 % алмазных зерен, объем карманов достиг  $95 \cdot 10^{-3} \frac{mm^3}{mm^2}$  и разрушение АГП пошло лавинообразно. Предельное

значение  $\omega_{\max} = 118 \cdot 10^{-3} \text{ мм}^3/\text{мм}^2$ , вычисленное по эмпирической формуле (3) и характеризующее стадию прекращения роста карманов, когда достигается динамическое равновесие абразивного износа алмазных зерен и гидроабразивного износа связки, так и не было достигнуто. Таким образом, период стойкости правящего ролика с АГП без протекции в вышеуказанных условиях составил 3,7 у.е. диспергированного материала, а период до полного разрушения АГП – около 5 у.е.

Для ролика с протекцией характер изменения удельного объема карманов отличался от кривой первого ролика и описывался выражением

$$\omega = (79 - 40e^{-0,527x}) \cdot 10^{-3}. \quad (5)$$

Во-первых, как видно на рис. 2, а, при практически том же начальном объеме карманов темп их роста меньше. Во-вторых, объем успел достичь предельного значения  $\omega_{\max} = 79 \cdot 10^{-3} \text{ мм}^3/\text{мм}^2$ . Это значение удерживалось в течение длительного времени – практически в течение диспергирования 11 у.е. материала кругов. Первые единичные вырывы алмазных зерен из рабочей поверхности наблюдали в момент суммарного диспергирования 7 у.е., а массовые вырывы, когда было потеряно 40 % зерен, в момент диспергирования 11,2 у.е. абразивного материала шлифовальных кругов. После этого, как и для ролика без протекции, разрушение АГП произошло лавинообразно. Данные указывают на несомненное увеличение ресурса правящего инструмента на 90 % (7 у.е./3,7 у.е. = 1,9) и увеличение его “выносливости”, т. е. периода до полного разрушения АГП на 125 % (11,2 у.е./5 у.е. = 2,24).

Измерение линейного износа  $\delta$  (в мкм) роликов по рабочему профилю показали следующие результаты. С ростом объема  $x$  диспергированного материала износ рос линейно с одинаковым темпом как для АГП без протекции, так и с протекцией (см. рис. 2, б):

$$\delta = 2x. \quad (6)$$

Во-первых, это указывало на характер износа искусственных алмазных зерен посредством микроскалывания, когда характерная (для природных алмазов) площадка износа не образуется. Во-вторых, как отмечалось выше, здесь учитывали убыль алмазов исключительно за счет его износа, а не за счет его вырывания из связки. Поэтому износ связки и прочность удержания зерен (разумеется, на стадии, предшествующей массовому вырыву зерен) не сказывались на размерной стойкости инструмента, последняя зависела только от прочности (марки) алмазного порошка, физико-механических характеристик управляемых кругов и режимов правки, что является предметом отдельных исследований и выходит за рамки данной работы.

Как видно на рис. 2, б, для инструмента без протекции в момент диспергирования 3,7 у.е. абразивного материала, а для инструмента с протекцией – 7 у.е., линейная зависимость сменяется нелинейной, прогрессивной. Это объясняется началом вырывов алмазных зерен, уменьшением числа зерен на рабочей поверхности и, следовательно, увеличением термо-силовой нагрузки на зерно и его размерного износа. Абсолютная величина линейного износа рабочего профиля к концу периода стойкости по износу связки для инструмента без протекции и с протекцией составила 7,4 и 14 мкм соответственно. Понятно, если техническое задание на инструмент регламентирует более высокую точность, его ресурс заканчивается раньше. Но, с другой стороны, применение алмазного порошка более высоких марок вообще снимает вопрос размерного износа. Поэтому вопрос алмазоудержания и защиты свободной

поверхности связки от гидроабразивного износа остается (по крайней мере, для данных условий работы) определяющим для увеличения периода стойкости инструмента.

Для справки был пересчитан линейный износ алмазов  $\delta$  на традиционный удельный расход  $Q_{уд}$ :

$$Q_{уд} = \frac{\delta F n_c \pi d_p \gamma_a}{1 \text{ у.е.} \cdot \gamma_{аб}} = 3,24 \cdot 10^{-6} \text{ г} \cdot \text{г}^{-1} = 3,24 \text{ мг} \cdot \text{кг}^{-1}, \quad (7)$$

где  $\delta = 2 \cdot 10^{-3}$  мм;  $F = \frac{\pi}{6} d_v^2 = \frac{\pi}{6} (1,024 \cdot 0,4)^2 = 8,78 \cdot 10^{-2}$  мм<sup>2</sup> – среднее сечение зерна;  $n_c = 6$  мм<sup>-2</sup> – удельное число алмазных зерен;  $d_p = 125$  мм – диаметр ролика;  $\gamma_a = 3,5 \cdot 10^{-3}$  г·мм<sup>-3</sup>,  $\gamma_{аб} = 2,13 \cdot 10^{-3}$  г·мм<sup>-3</sup> – плотность алмаза и абразивного круга соответственно; 1 у.е. =  $2,097 \cdot 10^5$  мм<sup>3</sup>/мм.

Остается решить вопрос об определяющем факторе, обуславливающем момент первых вырывов алмазных зерен из рабочей поверхности правящего инструмента. Если для инструмента без протекции АГП этот момент соответствовал объему карманов  $\omega = 85 \cdot 10^{-3}$  мм<sup>3</sup>/мм<sup>2</sup>, то для инструмента с протекцией –  $79 \cdot 10^{-3}$  мм<sup>3</sup>/мм<sup>2</sup>. Неужели протекция микропорошком ослабила удержание зерен и они вырывались при меньшем износе связки? Почему же тогда период стойкости такого инструмента увеличился на 90 %? Конечно же, никакого ослабления никелевой матрицы не произошло. Дело в том, что для инструмента с протекцией объему карманов  $79 \cdot 10^{-3}$  мм<sup>3</sup>/мм<sup>2</sup> соответствовал линейный износ зерен в 14 мкм, который выбрал часть заделки зерен в связке. Дадим количественную оценку названных величин и отследим их функциональную связь посредством анализа простейших модельных представлений.

Если обозначить символом  $H$  среднее значение выступания (вылета) зерна над связкой,  $h$  – среднюю глубину заделки зерна в связке,  $\delta$  – как и выше, линейный износ рабочей части зерна, а  $d$  – диаметр зерна, моделируемого как шар (рис. 3), то очевидно равенство

$$d = \delta + H + h. \quad (8)$$

Удельный объем карманов как функция  $H$  и  $\delta$  вычисляется по формуле

$$\omega(H, \delta) = H - \pi n_c \left[ (d - \delta) \delta H + \left( \frac{d}{2} - \delta \right) H^2 - \frac{1}{3} H^3 \right]. \quad (9)$$

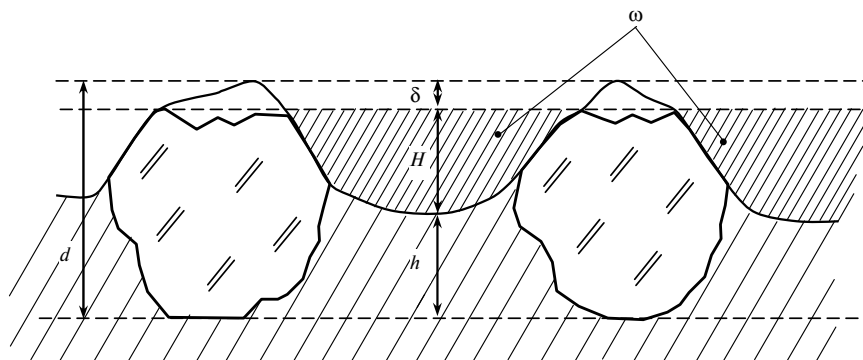


Рис. 3. К выводу связи средних значений линейного износа  $\delta$ , вылета над связкой  $H$  и глубины заделки  $h$  в связке алмазного зерна характерного размера  $d$ .

Подставляя в (9) значение линейного износа  $\delta$  как функции объема  $x$  диспергированного материала кругов (6) и приравняв полученное выражение к выражению (4) удельного объема карманов как функции  $x$ , получим уравнение относительно  $H$ . Это кубическое уравнение удобно решать численно. Получим значение корня как функции объема диспергированного материала  $H = H(x)$ . Далее находится искомая средняя глубина заделки

$$h(x) = d - H(x) - \delta(x). \quad (10)$$

Для наглядности  $\delta$ ,  $\omega$ ,  $H$  и  $h$  протабулированы по  $x$  (таблица). В графическом виде эти данные отражены на рис. 2, в как две кривые изменения средней глубины заделки зерна от  $x$ : 1 – для инструмента без протекции и 2 – для инструмента с протекцией. В критических точках  $x = 3,7$  и  $7,0$  у.е. кривые 1 и 2 соответственно дают одно и то же критическое значение глубины заделки  $h_{кр} = 233 \cdot 10^{-3}$  мм. Это означает, что при такой заделке, составляющей 58 % от высоты зерна ( $d = 0,4$  мм), зерно вырывается из матрицы под действием текущих нагрузок (при бóльшей нагрузке на зерно – при соответствующих режимах – критическая заделка будет больше, при меньших – меньше). Продолжение кривых для  $x$ , бóльших критических, показано пунктирной линией, что отвечает линейному закону возрастания износа алмазных зерен. Реальные кривые, отвечающие нелинейному, прогрессивному росту износа, показаны сплошными линиями, резко спускающимися вниз (со стрелками). В точках  $x = 5,0$  и  $11,2$  у.е. кривые 1 и 2 обрываются, что соответствует полному разрушению АГП.

**Значение линейного износа  $\delta$ , удельного объема  $\omega$ , высоты над связкой  $H$  и глубины заделки  $h$  алмазных зерен в АГП без протекции и с протекцией**

x, у.е.	$\delta$ , $10^{-3}$ мм	Без протекции			С протекцией		
		$\omega$ , $10^{-3}$ мм	$H$ , $10^{-3}$ мм	$h$ , $10^{-3}$ мм	$\omega$ , $10^{-3}$ мм	$H$ , $10^{-3}$ мм	$h$ , $10^{-3}$ мм
0	0	39	47	353	39	47	353
1	2	54	72	326	55	74	324
2	4	68	104	292	65	97	299
3	6	79	139	255	71	115	279
4	8	87	173	219	74	127	265
5	10/25*	94	207/239	183/136	76	137	253
6	12	99	231	157	77	146	242
7	14	103	248	138	78	153	233
8	16	106	260	124	78	158	226
9	18/40	108	269	113	79	167/213	215/147
10	20	110	276	104	79	172	208
11	22/100				79	177/234	201/66
12	24				79	182	194

\*Значение в знаменателе соответствует прогрессивному росту  $\delta$  вследствие начала вырывания зерен из рабочей поверхности инструмента как без протекции, так и с протекцией.

Таким образом, сравнительные стойкостные испытания алмазных правящих роликов с обычным АГП и АГП с протекцией алмазным микропорошком объективно доказали эффективность такой протекции. Ролики с защитой обладают увеличенным на 90 % периодом стойкости и увеличенным на 125 % периодом до полного разрушения АГП. Кроме того, на базе простых модельных представлений о структуре алмазного слоя правящего инструмента теоретически отслежена динамика изменения глубины заделки в связке алмазных зерен, установлена связь этой величины с характеристиками износа связки и алмазных зерен – с удельным объемом карманов и линейным износом соответственно.

*Наведено порівняльний аналіз результатів стійкісних випробувань правлячих роликів з традиційним алмазно-гальванічним покриттям (АГП) і АГП з протекцією. Показано, що протекція АГП алмазним порошком підвищує період стійкості правлячого інструменту, виготовленого методом гальванопластики, на 90 %, а період до повного руйнування АГП – на 125 %. Теоретично відслідковано динаміку зміни глибини закладення у зв'язуючому алмазних зерен, встановлено зв'язок цієї величини з характеристиками зносу зв'язуючого і алмазних зерен.*

**Ключові слова:** алмазно-гальванічне покриття, протекція алмазним мікропорошком, правлячий інструмент, період стійкості.

*The report is a comparative analysis of the results of life tests dress rollers with traditional diamond-galvanic covering (DGC), and DGC with protection. It is shown that protection AGP by diamond micro-powder increases resistance during the dress tool made by electroforming, by 90 %, and the period until complete destruction AGW – by 125 %. Theoretically tracked the dynamics of change in the depth embedment of diamond grains in binder, was set relationship of this value with the characteristics wear of binder and diamond grains.*

**Keywords:** diamond-galvanic covering, protection by diamond micro-powder, dress tool, period of resistance.

1. Шейко М. Н., Скок В. Н. Алмазно-гальваническое покрытие с протекцией алмазным микропорошком в правящем инструменте. Сообщение 1. Режим нанесения покрытия // Сверхтв. материалы. – 2017. – № 2. – С. 78–87.
2. Шейко М. Н., Пасичный О. О., Скок В. Н., Бологов П. И. Квазиврезная правка абразивных кругов как экспресс-метод испытания алмазных фасонных роликов. Сообщение 1. Регистрация сил правки // Там же. – 2009. – № 4. – С. 65–75.
3. Бологов П. И., Максименко А. П., Пасичный О. О. и др. Экспресс-метод испытания алмазных фасонных роликов методом квазиврезной правки абразивных кругов // Процеси механічної обробки в машинобудуванні: Зб. наук. пр. – Житомир: ЖДТУ, 2010. – Вып. 8. – С. 31–43.
4. Шейко М. Н. Абразивный износ отдельных зерен в алмазных роликах и брусках при правке абразивных кругов и его связь с износом алмазов в инструменте в целом // Сверхтв. материалы. – 2007. – № 6. – С. 58–64.
5. Шейко М. Н., Мацкевич В. П., Немец В. М., Скок В. Н. Эволюция рабочей поверхности алмазных брусков в процессе врезной правки // Сучасні процеси механічної обробки інструментами с НТМ и якість поверхні деталей машин: Зб. наук. робот (Серія Г “Процеси механічної обробки, верстати та інструменти”) НАН України, ИНМ ім. В. М. Бакуля. – Київ, 2006. – С. 118–125.
6. Шейко М. Н., Бородавко Д. Н., Скок В. Н. Эволюция рабочей поверхности алмазных правящих брусков на стадии, предшествующей ее разрушению // Сверхтв. материалы. – 2007. – № 2. – С. 65–72.

Поступила 29.03.16