

Инструмент, порошки, пасты

УДК 621.922.34

М. Н. Шейко*, В. Н. Скок

Институт сверхтвердых материалов им. В. Н. Бакуля

НАН Украины, г. Киев, Украина

**max-kiiev@i.ua*

Алмазно-гальваническое покрытие с протекцией алмазным микропорошком в правящем инструменте.

Сообщение 1. Режим нанесения покрытия

Предложен способ протекции алмазно-гальванического покрытия в правящем инструменте, изготовленном методом гальванопластики, состоящий в использовании алмазного микропорошка, содержащегося в поверхностном слое никелевой связки покрытия и защищающего поверхность связки от гидроабразивного износа. Представлен метод расчета режима осаждения никеля – основы нанесения алмазно-гальванического покрытия – с учетом изменения площади свободной поверхности осаждения за счет площади сечения алмазных зерен рабочей фракции и микропорошка, который позволяет вычислить скорость, времени заравнивания, конечную толщину покрытия и его защитного подслоя.

Ключевые слова: алмазно-гальваническое покрытие, правящий инструмент, метод гальванопластики, протекция, алмазный микропорошок, режим нанесения покрытия.

Совершенствование алмазного правящего инструмента, работающего по абразивному материалу шлифовальных кругов, как известно, сопряжено с применением алмазного порошка все более высоких, термостойких марок. Если сравнительно недавно были доступны лишь марки АС32 [1], то сейчас в практике изготовления и применения правящего инструмента – прежде всего алмазных роликов и брусков – используются синтетические алмазы марок АС100...АС200Т и выше. В связи с этим баланс расхода алмазов перераспределяется от абразивного износа алмазов в сторону увеличения относительного объема вырываемых из связки еще не изношенных алмазных зерен. Это становится возможным даже при номинальных нагрузках на зерно при ослаблении его заделки в никелевой связке вследствие ее вымывания.

Механизм последнего детально исследован в [2, 3] и идентифицирован как гидроабразивный износ связки правящего инструмента шламом диспер-

© М. Н. ШЕЙКО, В. Н. СКОК, 2017

гированного материала абразивных шлифовальных кругов. Закон гидроабразивного износа аналитически записывается следующим образом:

$$\omega = v - (v - v_0)e^{-kn}, \quad (1)$$

где ω – текущий объем карманов в межзеренном пространстве на единице площади рабочей поверхности правящего инструмента, $\text{мм}^3/\text{мм}^2$; v – объем диспергированного абразива, поступающего в карманы за одно касание с абразивным кругом, $\text{мм}^3/\text{мм}^2$; k – безразмерный коэффициент пропорциональности, зависящий от соотношения твердости связки и абразива; n – число касаний рабочей поверхности инструмента с заправляемым кругом; v_0 – начальный уровень карманов вскрытого инструмента, $\text{мм}^3/\text{мм}^2$. Из выражения (1) вытекает, что удельный объем карманов ω растет и асимптотически приближается к предельному значению ω_{max} , равному v . Часто это предельное значение ω_{max} , зависящее от режимов правки и характеристик алмазно-гальванического покрытия (АГП), настолько велико, что соответствующая ему заделка зерен не способна удержать их от вырывания. На практике это происходит на выступающих вершинах рабочего профиля правящего инструмента, например, вершинах резьбового профиля. Вследствие этого инструмент с неиспользованным в целом ресурсом снимается с операции в аварийном порядке. Было доказано [4], что повышение твердости свободной поверхности связки, в том числе посредством покрытия нитридом титана, снижает темп роста объема карманов ω .

Чтобы интенсифицировать этот эффект – эффект протекции никелевой связки от потока шлама диспергированного материала заправляемого круга – было предложено создать защитный алмазно-никелевый подслоя, представляющий собой алмазный микропорошок максимально возможной объемной концентрации, закрепленный гальванически осажденным никелем. В отличие от покрытия нитридом титана, имеющего толщину несколько микрометров, алмазно-никелевый защитный подслоя формируется толстым, соизмеримым с размером алмазного зерна рабочей фракции. При этом защитное действие подслоя устойчиво и не подвержено случайному разрушению, как тонкое покрытие.

Остановимся на конструкционном и технологическом решении создания такого подслоя (рабочие характеристики правящего инструмента с протекцией будут рассмотрены в следующем сообщении). Для правящего инструмента (алмазных роликов), изготавливаемого методом гальванопластики, защитный подслоя из алмазного микропорошка формируется после предварительного закрепления алмазных зерен рабочей фракции на поверхности графитовой формы, обратной рабочей поверхности инструмента [1]. Графитовая форма, закрытая с двух сторон ионообменными диафрагмами, помещается в камеру, снабженную приводом вращения, монтируется таким образом, чтобы обеспечить свободный доступ электролита к поверхности осаждаемого никеля и контакт технологического запаса микропорошка как сыпучего материала с той же поверхностью. Степень погружения графитовой формы в электролит (рис. 1) должна гарантировать выполнение условия, согласно которому номинальная площадь осаждения никеля не должна превышать текущую номинальную площадь контакта алмазного микропорошка с графитовой формой. В противном случае объемная концентрация микропорошка в алмазно-никелевом подслое будет принудительно снижаться, что нивелирует защитные свойства этого подслоя.

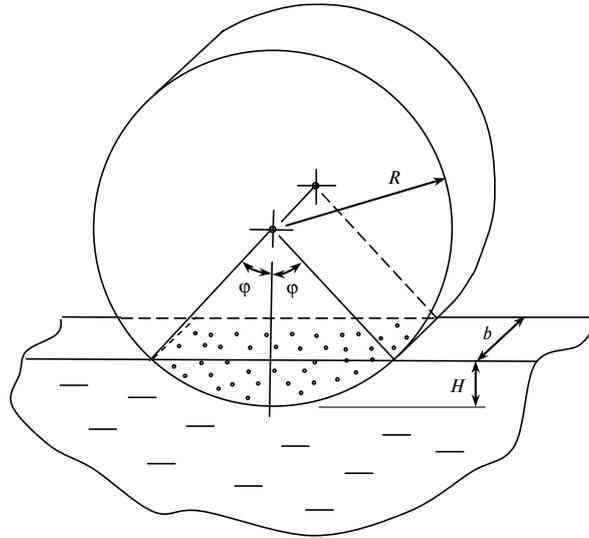


Рис. 1. Внутренний объем графитовой формы в виде тела вращения с максимальным радиусом R и высотой b , частично заполненный технологическим запасом алмазного микропорошка: H – глубина погружения в электролит.

Номинальную площадь осаждения никеля, а также навеску алмазного микропорошка с известной точностью можно рассчитать с учетом некоторых упрощающих моментов. Так, высота профиля рабочей поверхности правящего ролика (а следовательно, и графитовой формы) намного меньше радиуса R , поэтому искомую номинальную площадь можно рассчитать как долю φ/π (см. рис. 1) от площади периферийной поверхности тела вращения.

Массу микропорошка оценивали, полагая, что при вращении графитовой формы вокруг горизонтальной оси микропорошок – как сыпучий материал – пересыпается от участка к участку внутреннего объема формы, сохраняя в динамике форму прямой криволинейной призмы высотой b , в основании которой лежит круговой сегмент радиусом R , высотой H и центральным углом 2φ . Ее объем

$$V_{\text{приз}} = \frac{R^2}{2} (2\varphi - \sin 2\varphi) b, \quad (2)$$

где $\varphi = \arccos(1 - H/R)$. Объемная плотность микропорошка оценивается как $0,62\gamma_a$ [5], где γ_a – плотность алмаза. Тогда искомая масса

$$m_a = 0,62\gamma_a V_{\text{приз}}. \quad (3)$$

Как отмечалось выше, технологический запас навески алмазного микропорошка выбирали не меньше m_a (3).

Площадь внутренней периферийной поверхности графитовой формы – величина индивидуальная для каждого типоразмера правящего инструмента. В серии экспериментов по отработке технологии нанесения АГП с протекцией применялись фасонные правящие ролики с профилем, показанным на рис. 2. Основная фракция алмазного порошка представлена маркой АС200Т и зернистостью 400/315, а защитный подслои алмазного микропорошка – АСН 40/28. Исходя из выбранного типоразмера, были заданы следующие параметры внутреннего объема графитовой формы, погруженного в электролит (см. рис. 1):

$$R = 62 \text{ мм}, H = 31 \text{ мм}, b = 16 \text{ мм}, \varphi = \arccos\left(1 - \frac{31}{62}\right) = \frac{\pi}{3},$$

а также вычислены по (2) и (3)

$$V_{\text{приз}} = \frac{62^2}{2} \left(2 \frac{\pi}{3} - \sin\left(2 \frac{\pi}{3}\right) \right) 16 = 37775 \text{ (мм}^3\text{)};$$

$$m_a = 0,62 \cdot 3,5 \cdot 10^{-3} \cdot 37775 = 82 \text{ г} = 410 \text{ (карат)}.$$

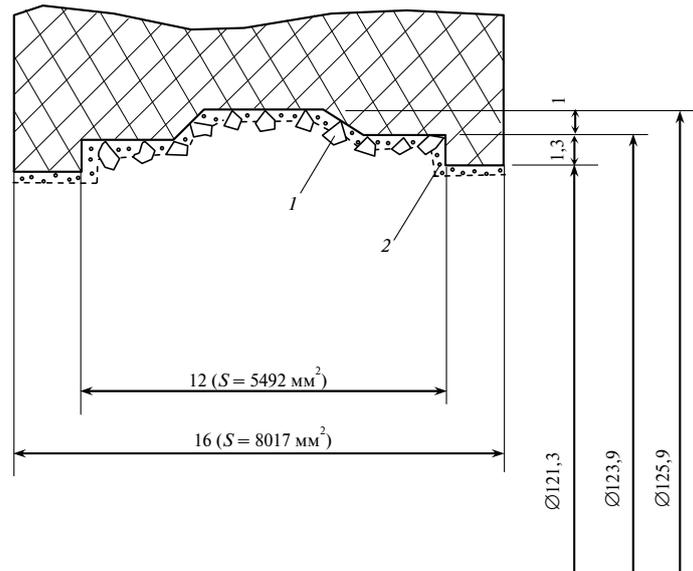


Рис. 2. Фрагмент графитовой формы (в радиальном сечении) и ее внутренней периферийной поверхности, обратной рабочей поверхности алмазного правящего ролика: 1 – зерна алмазного порошка рабочей фракции; 2 – защитный подслоя алмазного микропорошка.

Для расчета режимов осаждения никеля необходим блок информации о следующих номинальных площадях: об общей площади поверхности графитовой формы, находящейся под электролитом

$$S_0 = 8017 \frac{\pi/3}{\pi} = 2672 \text{ (мм}^2\text{)}, \quad (4)$$

и о площади поверхности под рабочей фракцией алмазного порошка (400/315) и погруженной в электролит

$$S_1 = 5492 \frac{\pi/3}{\pi} = 1831 \text{ (мм}^2\text{)}. \quad (5)$$

Второй необходимый блок информации – информация о структуре формируемого АГП в ортогональном рабочей поверхности направлении, т. е. по глубине. На рис. 3 представлена структура АГП, где первый подслоя толщиной h_1 , сопряженный с графитовой формой, – это защитный подслоя, состоящий из алмазного микропорошка АСН 40/28, закрепленного гальванически осажденным никелем. Одновременно этот подслоя является частью матрицы, удерживающей зерна рабочей фракции АС200Т 400/315, поэтому условная формула подслоя может быть записана как АС200Т 400/315 + АСН 40/28 + Ni. Второго подслоя, лежащий в интервале от h_1 до h'_2 , – это никелевая, без включения микропорошка, матрица, удерживающая зерна рабочей

фракции; условная формула – AC200T 400/315 + Ni. Третий, лежащий в интервале глубин от h_2' до h_2 , – это оставшаяся часть никелевой матрицы без алмазных зерен; условная формула – Ni.

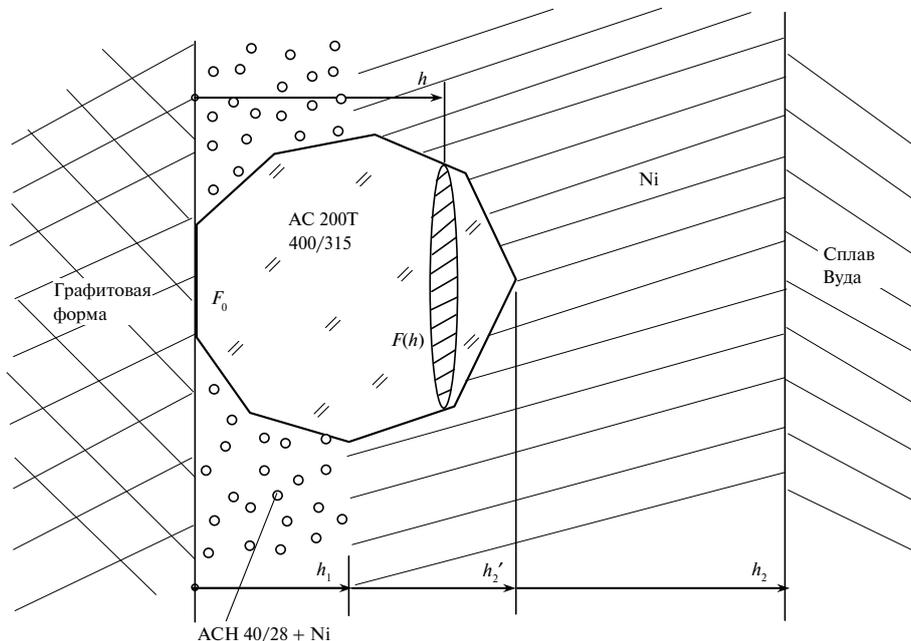


Рис. 3. Структура АГП.

Общая толщина АГП назначается как $h_2 = 1,5$ мм, что, как показывает опыт, обеспечивает достаточную жесткость покрытия при данной зернистости рабочей фракции. Толщина алмазного слоя d_t рабочей фракции экспериментально [6, 7] и теоретически [8] исследована авторами настоящей работы. Для алмазного порошка AC200T 400/315 $d_t = 0,413$ мм, а глубина h_1 защитного алмазно-никелевого подслоя равна 1/2 толщины d_t , что составляет $h_1 = 0,207$ мм. Это создает достаточный запас времени защитного действия при возможной выработке подслоя и не разрушает заделку зерен рабочей фракции в однородной никелевой матрице.

Следующий, третий, блок исходной информации касается характера изменения фактической площади свободной поверхности осаждения никеля по мере зарастивания. Номинальная площадь S_0 изначально уменьшается, как показано в [8], за счет суммарной площади контакта зерен рабочей фракции с графитовой формой, затем – за счет суммарной площади поперечных сечений алмазных зерен поверхностью, эквидистантной поверхности формы со значением эквидистанты h , т. е. в момент, когда толщина осажденного никеля достигает значения h . Кроме того, в интервале глубин $h \in [0, h_1]$ следует учитывать алмазный микropорошок, также уменьшающий фактическую площадь осаждения. Общее выражение фактической площади осаждения никеля на глубине h от поверхности графитовой формы следующее:

$$S(h) = S_0 (1 - K_V) \left(1 - \frac{S_1}{S_0} n_c F(h) \right), \quad (6)$$

где K_V – объемная концентрация микропорошка в соответствующем подслое, n_c – удельное число алмазных зерен рабочей фракции на рабочей поверхности, $F(h)$ – площадь поперечного сечения зерна рабочей фракции на глубине h и усредненная по всему массиву зерен на рабочей поверхности. В интервале глубин от 0 до h_1 величина K_V принимает значение 0,62 – как максимально возможная объемная концентрация [5]. На большей глубине микропорошок отсутствует; поэтому формально принимается $K_V = 0$. Аналогично удельное число n_c вне интервала $h \in [0, h'_2]$ равно 0. Условная концентрация K алмазного порошка в правящем инструменте, согласно [5], равна приблизительно 180 %, а удельное число для зернистости 400/315 в указанном интервале глубин $n_c = 5,43 \text{ мм}^{-2}$. Формула поперечного сечения $F(h)$ как функции глубины h получена в [8]:

$$F(h) = G S_G(h) + (1 - G) S_{1-G}(h), \quad (7)$$

где

$$S_G(h) = \frac{\pi}{4} D^2(h),$$

$$D(h) = d_v \left(1 - (1 - \sqrt{\mu}) \left(\frac{2h}{0,90d} - 1 \right)^2 \right), \quad 0 \leq h \leq 0,90d$$

$$S_{1-G}(h) = \pi \left(\frac{d_v}{d_t} \right)^3 (d_t - h)h, \quad 0 \leq h \leq d_t$$

$$G = 1 - e^{-2,22d}.$$

Для зерен AC200T 400/315 значения констант следующие: $d = 0,4 \text{ мм}$, $d_v = 0,4096 \text{ мм}$ [5], $\mu = 0,35$, $G = 0,589$ [8].

Четвертый блок информации касается скорости осаждения никеля. Согласно первому закону Фарадея [9], масса вещества, выделенного на электроде при электролизе, пропорциональна количеству электричества Q , прошедшего через электролит:

$$m = kQ, \quad (8)$$

где k – электрохимический эквивалент осаждаемого вещества, который находится в соответствии со вторым законом Фарадея:

$$k = \frac{A}{FZ}, \quad (9)$$

где A – атомный вес элемента; Z – его валентность; A/Z , г/г-эquiv – химический эквивалент; F – число Фарадея ($F = 96500 \text{ К/г-эquiv}$). Разделив обе части равенства (8) на плотность осаждаемого вещества γ и на площадь осаждения, а затем проинтегрировав равенство по времени, получаем выражение для скорости осаждения в перпендикулярном направлении:

$$\frac{dh}{dt} = \frac{k}{\gamma} j, \quad (10)$$

где j , А/мм² – плотность тока на поверхности катода, т. е. на неизолированной поверхности графитовой формы. Здесь для удобства скорость осаждения обозначена как производная толщины осаждаемого слоя h по времени в форме Лагранжа. Электрохимический эквивалент никеля в соответствии с (9) равен

$$k = \frac{1}{96500} \left(\frac{58,71}{2} \right) = 3,04 \text{ (г/К)},$$

а плотность

$$\gamma = 8,9 \cdot 10^{-3} \text{ г/мм}^3.$$

Тогда (10) можно переписать в виде

$$\frac{dh}{dt} = 3,4 \cdot 10^{-2} j, \text{ мм/с}, \quad (11)$$

где размерность множителя при j – $\text{мм}^3/(\text{А} \cdot \text{с})$.

На основании вышеприведенной информации можно рассчитать режим осаждения никеля. Одним из определяющих параметров является плотность тока осаждения. Для нормального протекания процесса рекомендуется [10, 11] значение $j_{\text{опт}} = 10^{-4} \text{ А/мм}^2$. Как отмечалось выше, свободная площадь осаждения никеля меньше номинальной и меняется с ростом толщины осаждаемого слоя. Вследствие этого при постоянной силе тока в цепи плотность тока переменна и ее вариация значительна. В идеальном случае следует подобрать программу изменения во времени силы тока так, чтобы плотность была постоянна и равнялась $j_{\text{опт}}$. На практике АГП разбивается по глубине на несколько участков и в пределах каждого из них обеспечивается свое постоянное значение тока. При этом вариация плотности тока не должна выходить за допустимые пределы.

Сила тока I_i на участке АГП в пределах глубины, скажем, от h_{i-1} до h_i находится из условия того, что средняя на участке плотность тока равна оптимальной рекомендуемой:

$$j \equiv I_i \left(\overline{\frac{1}{S(h)}} \right) = j_{\text{опт}}. \quad (12)$$

Усреднение обратной площади $S(h)$ производится по h :

$$\left(\overline{\frac{1}{S(h)}} \right) = \frac{1}{h_i - h_{i-1}} \int_{h_{i-1}}^{h_i} \frac{dh}{S(h)} = \frac{1}{S_0(1 - K_V)(h_i - h_{i-1})} \int_{h_{i-1}}^{h_i} \frac{dx}{1 - \frac{S_1}{S_0} n_c F(x)}.$$

Из последнего равенства искомая сила тока на i -ом участке определяется как

$$I_i = \frac{j_{\text{опт}} S_0(1 - K_V)(h_i - h_{i-1})}{\int_{h_{i-1}}^{h_i} \frac{dx}{1 - \frac{S_1}{S_0} n_c F(x)}}, \quad (13)$$

а текущая плотность как функция толщины осажженного слоя

$$j(h) = \frac{I_i}{S_0(1 - K_V) \left(1 - \frac{S_1}{S_0} n_c F(h) \right)}, \quad (14)$$

где параметры K_V и n_c , как указано в комментариях к (6), получают значения в зависимости от рассматриваемого интервала. Если вариация плотности (14) не превышает предельных значений, интервал глубин h и ток I_i выбраны правильно.

Второй важнейший параметр процесса осаждения никеля – это время осаждения t . Для i -го участка

$$t_i = \int_{h_{i-1}}^{h_i} \frac{dx}{\frac{dh}{dt}(x)} = \frac{S_0(1 - K_V)}{3,4 \cdot 10^{-2} I_i} \int_{h_{i-1}}^{h_i} \left(1 - \frac{S_1}{S_0} n_c F(x) \right) dx. \quad (15)$$

Следует учесть, что осаждение никеля происходит на погруженную в электролит долю ϕ/π длины направляющей внутренней поверхности графитовой формы. Следовательно, время нахождения в гальванической ванне увеличивается в π/ϕ раза.

Авторами были экспериментально подобраны интервалы глубин осаждаемого никеля, на которых назначены постоянные значения тока осаждения, а следовательно, установлены следующие этапы зарастивания. Первый этап – это этап, на котором осуществляется осаждение никеля совместно с алмазным микропорошком на графитовую форму с предварительно закрепленным алмазным порошком рабочей (400/315) фракции. Интервал глубин – от 0 до h_1 .

Второй этап начинается с изъятия из внутреннего объема графитовой формы остатка технологического запаса навески алмазного микропорошка – того остатка, что не закрепился на первом этапе осажженным никелем. При этом результаты первого этапа могут быть визуально проконтролированы – алмазные зерна рабочей фракции должны быть зарощены до половины. На втором этапе расчетную сила тока выдерживали постоянной до полного формирования АГП, т. е. до глубины h_2 . Для удобства расчетов второй этап можно разделить на два подэтапа: в течение первого – зерна рабочей фракции зарастиваются до полной высоты (удельное число n_c здесь ненулевое), а в течение второго, самого продолжительного, – происходит формирование однородного никелевого слоя по всей номинальной площади S_0 .

Для удобства использования рабочие формулы расчета режимов формирования АГП методом гальванопластики сведены в таблицу.

Рабочие формулы для расчета параметров режимов осаждения никеля на различных этапах формирования АГП

Этап	Параметр	Осаждение никеля в интервале глубин		
		от 0 до h_1 (совместно с микропорошком)	от h_1 до h'_2	от h'_2 до h_2
1	Фактическая площадь свободной поверхности осаждения, мм^2	$S(h) = S_0(1 - K_V) \times \left(1 - \frac{S_1}{S_0} n_c F(h)\right)$	$S(h) = S_0 \left(1 - \frac{S_1}{S_0} n_c F(h)\right)$	$S(h) = S_0$
2	Ток осаждения, А	$I_1 = \frac{j_{\text{опт}} S_0 (1 - K_V) h_1}{\int_0^{h_1} \frac{dx}{1 - \frac{S_1}{S_0} n_c F(x)}}$	$I_2 = \frac{j_{\text{опт}} S_0 (h_2 - h_1)}{\int_{h_1}^{h'_2} \frac{dx}{1 - \frac{S_1}{S_0} n_c F(x)} + h_2 - h'_2}$	
3	Плотность тока осаждения, А/ мм^2	$j(h) = \frac{I_1}{S_0(1 - K_V)} \times \frac{1}{\left(1 - \frac{S_1}{S_0} n_c F(h)\right)}$	$j(h) = \frac{I_2}{S_0} \times \frac{1}{\left(1 - \frac{S_1}{S_0} n_c F(h)\right)}$	$j(h) = \frac{I_2}{S_0}$
4	Скорость осаждения, мм/с	$\frac{dh}{dt}(h) = 3,4 \cdot 10^{-2} j(h)$		

(Продолжение)

5	Время осаднения, с	$t_1 = \frac{S_0(1-K_V)}{3,4 \cdot 10^{-2} I_1} \times \int_0^{h_1} \left(1 - \frac{S_1}{S_0} n_c F(x)\right) dx$	$t'_2 = \frac{S_0}{3,4 \cdot 10^{-2} I_2} \times \int_{h_1}^{h'_2} \left(1 - \frac{S_1}{S_0} n_c F(x)\right) dx$	$t_2'' = \frac{S_0(h_2 - h'_2)}{3,4 \cdot 10^{-2} I_2}$
6	Время в гальванической ванной, ч	$\frac{t_1 \pi}{3600 \varphi}$	$\frac{(t'_2 + t_2'') \pi}{3600 \varphi}$	

Результаты расчета схематически представлены на рис. 4.

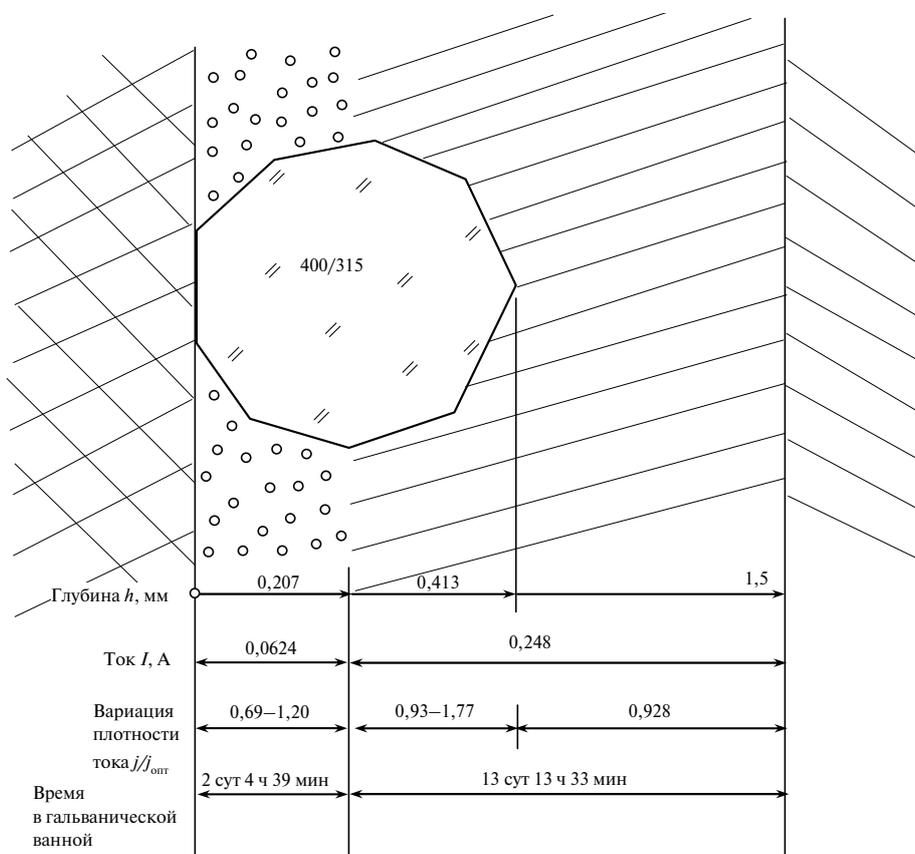


Рис. 4. Результаты расчета параметров режима зарощивания никеля при формировании АГП с протекцией.

Данные, представленные на рис. 4, дают полную информацию для установления режимов зарощивания никеля при формировании АГП с протекцией для правящих роликов (гальванопластика). Результаты реализации этой схемы и работоспособность модернизированного правящего инструмента будут освещены в следующем сообщении.

Запропоновано спосіб протекції алмазно-гальванічного покриття в правлячому інструменті, виготовленому методом гальванопластики, який полягає у

використанні алмазного мікропорошку, що міститься в поверхневому шарі нікелевої зв'язки АГП і що захищає поверхню зв'язки від гідроабразивного зносу. Подано метод розрахунку режиму осадження нікелю – основи нанесення алмазно-гальванічного покриття – з урахуванням зміни площі вільної поверхні осадження за рахунок площі перерізу алмазних зерен робочої фракції і мікропорошку, який дає можливість обчислити швидкість, час зарощування і кінцеву товщину АГП і його захисного підшару.

Ключові слова: алмазно-гальванічне покриття, правлячий інструмент, метод гальванопластики, протекція, алмазний мікропорошок, режим нанесення покриття.

This paper proposes a method of a protection of diamond-galvanic covering (DGC) in dress tool, manufactured by electroforming. The method is to use a diamond micropowder contained in the surface layer of nickel ligament DGC and protect the ligaments from hydroabrasive wear. The report proposed a method for calculating the mode of deposition of nickel – the basis of the application of DGC – taking into account changes in the area of the free surface deposition by cross-sectional area of diamond grains of the work fraction and micropowder. The calculation includes the calculation of speed, time of overgrowth and finite thickness DGC and protective sublayer.

Keywords: diamond-galvanic covering, dress tool, electroforming technology, protection, diamond micropowder, mode coating.

1. Коломиец В. В., Полупан Б. И. Алмазные правящие ролики при врезном шлифовании деталей машин. – К.: Наук. думка, 1983. – 144 с.
2. 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 з НТМ і якість поверхні деталей машин: Зб. наук. праць (Серія Г “Процеси механічної обробки, верстати та інструменти”) / НАН України. ІНМ ім. В. М. Бакуля. – К., 2006. – С. 118–125.
3. 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.
4. Шейко М. Н., Бондарь И. В. Кинетика гидроабразивного износа связки однослойного алмазного правящего инструмента с протекцией ионно-плазменными покрытиями // Высокие технологии в машиностроении и нормативно-техническое регулирование: Сб. XX междунар. науч.-техн. семинара ИНТЕРПАРТНЕР. – 2012. – Алушта, 2012. – С. 316–323.
5. Шейко М. Н., Скок В. Н., Лубнин А. Г. Основные характеристики абразивно-алмазного слоя правящих инструментов // Сверхтв. материалы. – 2007. – № 4. – С. 75–78.
6. Шейко М. Н., Скок В. Н. Форма зерен как фактор, определяющий параметры алмазно-гальванического покрытия правящего инструмента. Сообщение 1. Величина занижения корпуса инструмента под нанесение алмазно-гальванического покрытия методом гальваностегии // Там же. – 2015. – № 6. – С. 86–88.
7. Шейко М. Н., Скок В. Н., Пасичный О. О. Форма зерен как фактор, определяющий параметры алмазно-гальванического покрытия правящего инструмента. Сообщение 2. Фактическая площадь контакта зерен с графитовой формой и смежные характеристики как исходные для расчета режимов нанесения алмазно-гальванического покрытия методом гальванопластики // Там же. – 2016. – № 1. – С. 61–66.
8. Шейко М. Н. Форма зерен как фактор, определяющий параметры алмазно-гальванического покрытия правящего инструмента. Сообщение 3. Пространственная модель алмазного зерна – “бочка параболической и круговой клепки” // Там же. – 2016. – № 3. – С. 77–88.
9. Кошкин Н. И., Ширкевич М. Г. Справочник по элементарной физике. – М.: Наука, 1975. – 256 с.
10. Лобанов С. А. Практические советы гальванику. – Л.: Машиностроение, 1983. – 248 с.
11. Ямпольский А. М., Ильин В. А. Краткий справочник гальванотехника. – Л.: Машиностроение, 1981. – 269 с.

Поступила 19.10.16