

**Ф.В. НОВИКОВ**, докт. техн. наук

## НЕКОТОРЫЕ ПОДХОДЫ К РАСЧЕТУ ПРОИЗВОДИТЕЛЬНОСТИ ПРОЦЕССА АЛМАЗНОГО ШЛИФОВАНИЯ

В роботі розглянуті деякі підходи до розрахунку продуктивності процесу алмазного шліфування, дані практичні рекомендації щодо підвищення ефективності обробки.

Вопросу изыскания путей повышения производительности процесса алмазного шлифования в научно-технической литературе уделяется большое внимание. Существуют различные подходы к расчету производительности, однако они, на наш взгляд, не позволяют в полной мере выявить потенциальные возможности алмазного шлифования. В настоящей работе рассмотрены некоторые подходы к расчету производительности обработки и выявленные на их основе условия повышения эффективности шлифования.

Если снимаемый припуск детали, движущейся со скоростью  $V_{дет}$ , представить пакетом бесконечно тонких слоёв, входящих в рабочую поверхность круга, под разными углами  $\alpha_i$  (рис.1), то между  $V'_{дет}$  и  $V_{дет}$  существует связь

$$V'_{дет} = V_{дет} \cdot \cos \alpha_i, \quad (1)$$

где  $\alpha_i$  – угол между векторами скоростей  $V'_{дет}$  и  $V_{дет}$ .

Максимальная толщина среза  $H_{max}$  определится [1]

$$H_{max} = \bar{x} \cdot 3 \sqrt{\frac{100 \cdot \pi \cdot V_{дет} \cdot \cos \alpha_i}{3 \cdot \operatorname{tg} \gamma \cdot m \cdot z \cdot V_{кр}}}, \quad (2)$$

где  $\bar{x}$  – зернистость круга, м;  $m$  – объемная концентрация круга;  $V_{кр}$  – скорость круга, м/с;  $\gamma$  – половина угла при вершине конусообразного режущего зерна;  $z$  – безразмерный коэффициент, учитывающий глубину «утопания» режущих зерен в связку алмазного круга в процессе шлифования (для алмазных кругов на металлических связках, когда практически отсутствует «утопание» зерен в связку,  $z \cong 1$ ; для алмазных кругов на органических связках, когда «утопание» зерен возможно,  $z > 1$ ).

Таблица 1

Значения  $\cos \alpha_i$

$\alpha_i$ , град	0	45	70	80	85	89	90
$\cos \alpha_i$	1.0	0.75	0.342	0.174	0.0872	0.0175	0

Параметр  $H_{max}$  тем больше, чем меньше угол  $\alpha_i$ . Следовательно, наибольшее значение параметра  $H_{max}$  будет достигаться при срезе

периферийного слоя, угол входа которого в рабочую поверхность круга наименьший, табл. 1

Угол  $\alpha_i$  может быть выражен через координаты  $t_T$  (после несложных тригонометрических преобразований, рис. 1)

$$\cos \alpha_i = \frac{\sqrt{(2 \cdot R_{кр} - t_T) \cdot t_T}}{R_{кр}}, \quad (3)$$

где  $R_{кр}$  – радиус круга, м.

При  $t_T \ll 2R_{кр}$  справедливо

$$\cos \alpha_i = \sqrt{\frac{2 \cdot t_T}{R_{кр}}}. \quad (4)$$

и значение угла  $\alpha_i$  определяется соотношением  $t_T/R_{кр}$ .

Таблица 2

$\frac{t_T}{R_{кр}}$	0	0.002	0.005	0.01	0.1	0.2
$\alpha_i$ , град	90	17	84	82	63	50

При  $t_T = R_{кр}$  угол  $\alpha_i = 0$  и максимальная толщина среза равна  $H_{max}$ , согласно зависимости (2), принимает наибольшее значение. Данное условие выполняется при шлифовании образца, движущегося по нормали к периферии или торцу круга. Если образец движется асимметрично к периферии круга, т. е.  $\alpha_i > 0$ , то максимальная толщина среза  $H_{max}$  будет меньше.

Исходя из зависимости (1.51) с уменьшением  $\cos \alpha_i$  (т. е. увеличением угла  $\alpha_i$ ) скорость детали  $V_{дет}$  может быть увеличена при заданных значениях  $H_{max}$ ,  $\gamma$ ,  $m$ ,  $z$  и  $V_{кр}$ . Данная тенденция изменения  $V_{кр}$  установлена экспериментально. Например, установлено, что при шлифовании торцом алмазного круга детали, движущийся по нормали к кругу, её наибольшая скорость равна  $V_{кр} = 2$  мм/мин. При плоском шлифовании периферией алмазного круга той же детали с глубиной шлифования  $t = 0.5$  мм скорость детали достигает значения  $V_{кр} \cong 500$  мм/мин. Как видим отличие скоростей составляет 250 раз. Исходя из табл. 1.3 и зависимости (1.40), при  $t_T = 0.5$  мм и  $R_{кр} = 150$  мм;  $t_T/R_{кр} = 0.0033$ ;  $\alpha_i = 85^\circ$ ;  $\cos \alpha_i = 0.0816$ .

Отношение  $\cos 0^\circ / \cos 85^\circ = 12.3$ , т. е. скорости, отличаются для двух рассматриваемых случаев в 12.3 раз.

Следовательно, имеет место приблизительно 20-кратное расхождение экспериментальных и расчётных данных. Это может быть обусловлено тем, что при плоском шлифовании параметр  $H_{max}$  больше, чем при торцевом

шлифовании. Учитывая то, что  $H_{max} \equiv \sqrt[3]{V_{дет}}$ , 20-и кратное расхождение скоростей детали вызывает расхождение значений  $H_{max}$  всего в 2.7 раза, т. е.

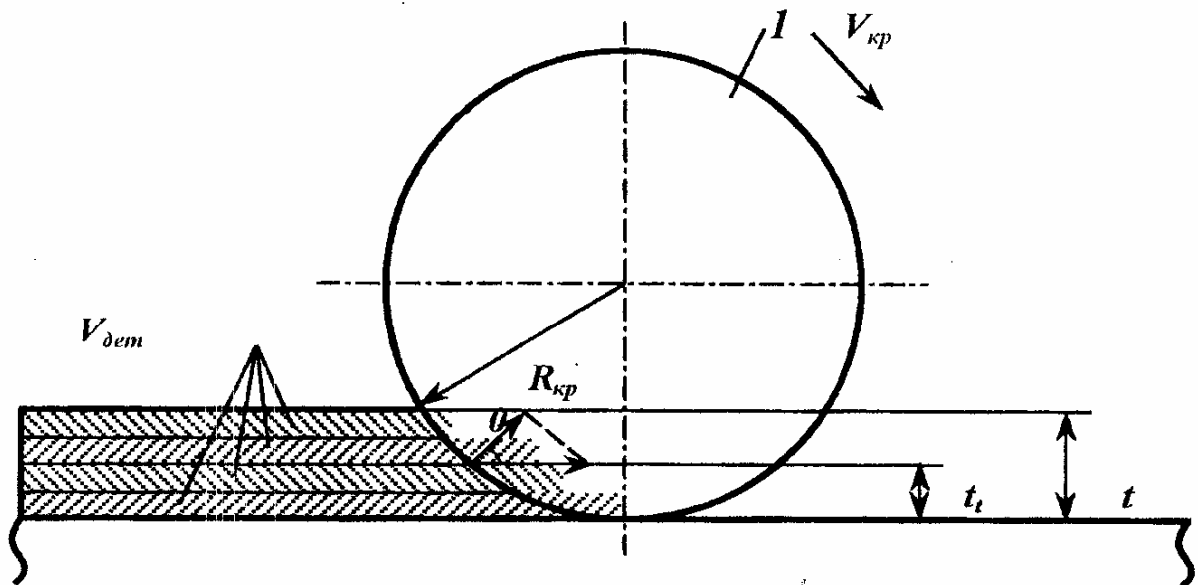


Рис. 1. Расчетная схема шлифования: 1 – круг; 2 – слой снимаемого припуска.

значительное изменение  $V_{дет}$  ведёт к незначительному изменению параметра  $H_{max}$ .

Уменьшение  $H_{max}$  при торцевом шлифовании может быть связано, во-первых, с относительно большой площадью контакта круга с деталью и необходимостью создания значительного радиального усилия (шлифование осуществлялось по упругой схеме). Во-вторых, с образованием длинных одинаковых по толщине срезов тогда, как при плоском шлифовании образуются срезы переменной толщины и процесс резания характеризуется меньшей силовой напряжённостью.

Используем зависимость (2) для определения производительности шлифования  $Q = B \cdot V_{дет} \cdot t_T$ :

$$Q = \frac{3 \cdot \text{tg} \gamma \cdot m \cdot z \cdot V_{кр} \cdot H_{max}^3 \cdot t_T \cdot B}{100 \cdot \pi \cdot x^3 \cdot \cos \alpha_i}, \quad (5)$$

где  $B$  – ширина шлифования, м.

Производительность  $Q$  тем больше, чем больше параметры  $m$ ,  $z$ ,  $V_{кр}$ ,  $H_{max}$ ,  $B$ ,  $\gamma$ ,  $\alpha_i$  и меньше  $x$ .

Иными словами, чем больше длина дуги контакта круга с деталью (определяемая параметром  $t_T$ ), максимальная толщина среза  $H_{max}$  (допускаемая, исходя из прочностных свойств зёрен и связки круга) и угол входа обрабатываемого материала в рабочую поверхность круга  $\alpha_i$ . Из этого

следует, что для увеличения  $Q$  необходимо использовать схему шлифования при асимметричном расположении детали по отношению к кругу. В данном случае параметр  $t_T$  определяет глубину шлифования  $t$ . Тогда с учетом зависимостей (4) и (5) производительность  $Q$  определяется

$$Q = \frac{3 \cdot \operatorname{tg} \gamma \cdot m \cdot z \cdot V_{\text{кр}} \cdot H_{\text{max}}^3 \cdot B}{100 \cdot \sqrt{2} \cdot \pi \cdot x^3} \cdot \sqrt{t \cdot R_{\text{кр}}} \quad (6)$$

Исходя из зависимости (6), увеличить  $Q$  можно увеличением глубины шлифования  $t$ , уменьшая  $V_{\text{дет}}$  по зависимости

$$V_{\text{дет}} = \frac{Q}{B \cdot t} = \frac{3 \cdot \operatorname{tg} \gamma \cdot m \cdot z \cdot V_{\text{кр}} \cdot H_{\text{max}}^3}{100 \cdot \sqrt{2} \cdot \pi \cdot x^3} \cdot \sqrt{\frac{R_{\text{кр}}}{t}} \quad (7)$$

Это условие обеспечивает шлифование с одинаковой максимальной толщиной среза  $H_{\text{max}}$ , т. е. с одинаковой силовой напряжённостью режущих зёрен с интенсивностью их износа.

По физической сути параметр  $H_{\text{max}}$  равен  $y$  – глубине внедрения режущего зерна в обрабатываемый материал

$$y = \sqrt{\frac{2 \cdot P_1}{\pi \cdot \operatorname{tg}^2 \gamma \cdot H \cdot V}} \quad (8)$$

где  $P_1$  – радиальная нагрузка, действующая на зерно, н;  $HV$  – твердость обрабатываемого материала по Виккерсу, н/м<sup>2</sup>.

Следовательно, параметр  $H_{\text{max}}=y$  тем больше, чем больше радиальная нагрузка  $P_1$ , действующая на зерно и меньше угол при вершине конусообразного зерна  $2\gamma$  и твердость обрабатываемого материала  $HV$ . В пределе нагрузка  $P_1$  равна прочности режущего зерна на раздавливание. Как известно, наибольшими значениями  $P_1$  характеризуются сверхтвёрдые материалы: природный и синтетический алмазы. С увеличением зернистости предельная нагрузка  $P_1$  увеличивается.

Абразивные материалы характеризуются меньшими значениями  $P_1$ . Кроме того, углы заострения абразивных зёрен  $2\gamma$  больше. Поэтому глубина внедрения абразивных зёрен  $y$  в обрабатываемый материал меньше. Добиться увеличения величины  $y$  можно за счёт непрерывного разрушения зёрен в процессе шлифования и обеспечения остроты режущих кромок, не допуская образования на зёрнах площадок износа, т. е. за счёт уменьшения угла  $\gamma$ . Чем интенсивнее процесс разрушения абразивных зёрен, тем меньше угол  $\gamma$ , больше параметр  $H_{\text{max}}=y$  и производительность обработки.

При резании алмазными зёрнами (характеризуемыми большими значениями  $P_1$ ) важно обеспечить прочное удержание их на рабочей поверхности инструмента. Применение, например, органических и керамических связок допускает "утопание" в них зёрен. В результате возникающая при резании радиальная составляющая силы резания, действующая на зерно, меньше предельной силы  $P_1$ , определяющей

прочность зерна на раздавливание. Следовательно, прочностные свойства режущего зерна используются не полностью. Применение металлических связок обеспечивает более прочное удержание зерна в инструменте. Радиальная составляющая силы резания, действующая на зерно, может достигать предельного значения  $P_1$ , в результате глубина внедрения зерна  $H_{max}=\gamma$  и соответственно производительность обработки  $Q$  увеличится.

Применяя прочные металлические связки, важно обеспечить своевременное удаление с рабочей поверхности инструмента (круга) затупившихся и разрушенных алмазных зёрен, подключение в работу новых зёрен. Для этого эффективно использовать электрофизикохимические методы правки, основанные на электроэрозионном (термическом) или электрохимическом разрушении металлических связок. В результате прочность удержания в связке зёрен уменьшается и они выпадают из круга. Регулируя интенсивность разрушения связки, можно таким образом регулировать степень затупления зёрен (по сути, углом  $\gamma$ ) и параметром  $H_{max}=\gamma$ , обеспечивая непрерывное поддержание в процессе шлифования высокой режущей способности алмазного круга. С учётом (8), зависимости (6) и (7) примут вид:

$$Q = \frac{6 \cdot m \cdot z \cdot B \cdot V_{кр}}{100 \cdot \pi \cdot x^3 \cdot \text{tg}^2 \gamma} \cdot \sqrt{t \cdot R_{кр}} \cdot \sqrt{\left(\frac{P_1}{\pi \cdot H \cdot V}\right)^3}, \quad (9)$$

$$V_{дем} = \frac{6 \cdot m \cdot z \cdot V_{кр}}{100 \cdot \pi \cdot x^3 \cdot \text{tg}^2 \gamma} \cdot \sqrt{\frac{R_{кр}}{t}} \cdot \sqrt{\left(\frac{P_1}{\pi \cdot H \cdot V}\right)^3}. \quad (10)$$

Исходя из зависимости (9), важнейшим условием увеличения производительности обработки  $Q$  следует рассматривать уменьшение угла  $\gamma$ , который входит во второй степени. Для этого необходимо обеспечить режим самозатачивания круга (интенсивного износа круга) или применять эффективные методы непрерывной правки круга.

Производительность обработки  $Q$  можно определить другим путём:

$$Q = \frac{V}{\tau}, \quad (11)$$

где  $V$  – объём снятого материала,  $\text{м}^3$ ;  $\tau$  – время обработки, с.

Рассматривая  $V=S \cdot l \cdot n$  (где  $S$  – площадь поперечного сечения среза отдельным зерном,  $\text{м}^2$ ;  $l$  – длина единичного среза, м;  $n$  – число зёрен, проконтактировавших с обрабатываемым материалом за время  $\tau$ , с учётом соотношений

$$S=0.5 \cdot H_{max}^2; \quad l=l_0+V_{дем} \cdot \tau; \quad \tau_0=l_0/V_{кр};$$

$l_0 = \sqrt{R_{кр} - (R_{кр} - t)^2} \cong \sqrt{2 \cdot R_{кр} \cdot t}$  (где  $l_0$  – длина дуги контакта круга с

деталью, м;  $\tau_0$  – время контакта зерна с обрабатываемым материалом, с, рис.2), а также с учётом соотношений  $n = n_0 \cdot \frac{H_{max}}{b} = k \cdot L \cdot B \cdot \frac{H_{max}}{b}$  (где  $L=V_{кр} \cdot \tau$

– длина рабочей поверхности круга, проконтактировавшая с обрабатываемым материалом за время  $\tau$ ,  $k$  – поверхностная концентрация зёрен, шт/м<sup>2</sup>;  $b$  – максимальная высота выступания зёрен над уровнем связки круга, м), получим

$$Q = 0.5 \cdot \frac{H^3_{\max}}{b} \cdot \sqrt{2 \cdot t \cdot R_{\text{кр}}} \cdot (V_{\text{кр}} + V_{\text{дет}}) \cdot k \cdot B. \quad (12)$$

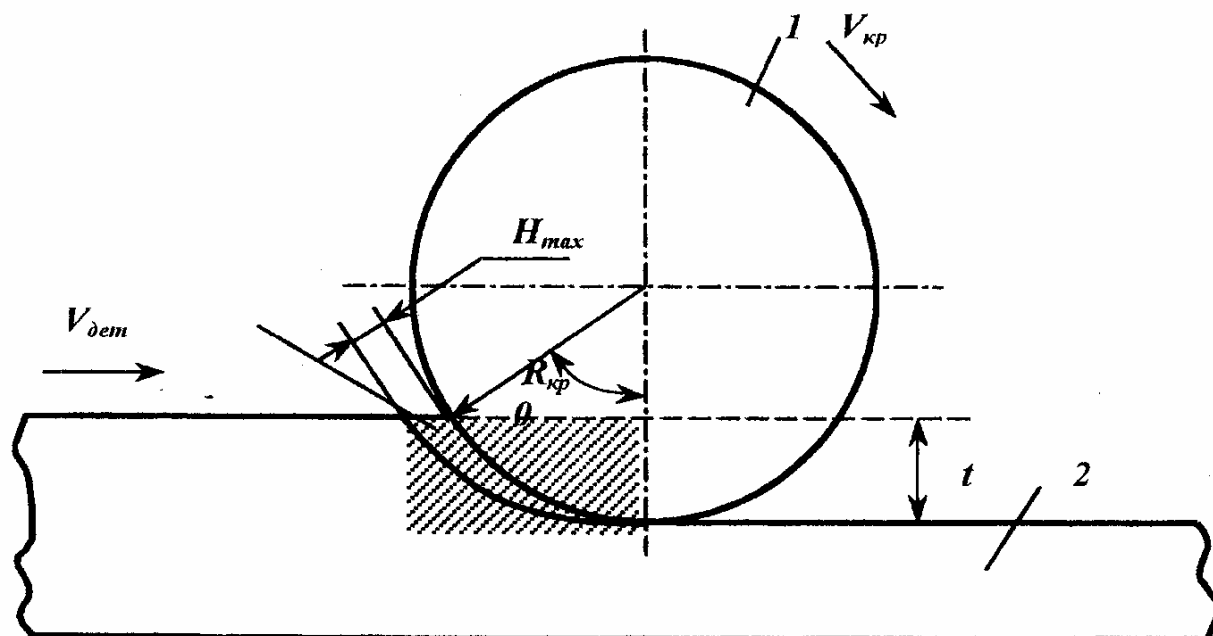


Рис. 2. Расчетная схема шлифования: 1 – круг; 2 – деталь; 3 – занятообразная форма среза.

Проведём анализ зависимости (12), преобразуя её с учётом  $t = \frac{Q}{B \cdot V_{\text{дет}}}$  к

виду

$$Q = 0.5 \cdot \frac{H^6_{\max}}{b^2} \cdot R_{\text{кр}} \cdot k^2 \cdot B \cdot \frac{(V_{\text{кр}} + V_{\text{дет}})^2}{V_{\text{дет}}}. \quad (13)$$

С увеличением  $V_{\text{дет}}$  производительность  $Q$  изменяется по экстремальной зависимости: в диапазоне  $0 < V_{\text{дет}} < V_{\text{дет}}^*$  производительность уменьшается, а в диапазоне  $V_{\text{дет}} > V_{\text{дет}}^*$  – увеличивается. При  $V_{\text{дет}} = V_{\text{дет}}^*$  имеет место минимум  $Q$ , рис.3,а.

Для определения экстремального значения  $V_{\text{дет}}^*$  продифференцируем зависимость (13) по  $V_{\text{дет}}$  и производную приравняем к нулю, откуда имеем  $V_{\text{дет}} = V_{\text{дет}}^*$ .

Минимальное значение  $Q$  определим, подставляя в (13) значение  $V_{\text{дет}} = V_{\text{дет}}^*$ :

$$Q = 2 \cdot R_{кр} \cdot k^2 \cdot B \cdot V_{кр} \cdot \frac{H_{\max}^6}{b^2} \quad (14)$$

Таким образом, установлено, что для высокопроизводительного шлифования необходимо скорость детали  $V_{дет}$  принимать или меньше, или больше скорости круга. Чем больше отличие значений  $V_{дет}$  и  $V_{дет}^*$ , тем больше производительность обработки  $Q$ . При этом глубину шлифования  $t$  необходимо устанавливать в соответствии с зависимостью  $t = \frac{Q}{B \cdot V_{дет}}$ .

Таблица 3.

Расчётные значения  $(1+N)^2/N$

$N$	0.001	0.01	0.1	1	2	3	4	10
$\frac{(1+N)^2}{N}$	1000	100	12.1	4	4.5	5.3	6.3	12.1
	Глубинное шлифование	Многопроходное шлифование		Нулевой уровень				

Представляя соотношение  $(V_{дет} + V_{кр})^2 / V_{дет}$  в виде  $(1+N)^2/N$  (где  $N = V_{дет}/V_{кр}$ ), в табл.3 приведены расчётные значения этого соотношения. С уменьшением  $N$ , начиная с  $N=1$ , соотношение  $(1+N)^2/N$  увеличивается почти по линейной зависимости. С увеличением  $N$ , начиная с  $N=1$ , соотношение  $(1+N)^2/N$  также увеличивается, однако с меньшей интенсивностью, чем в диапазоне  $N < 1$ . Следовательно, предпочтительно обработку вести в диапазоне  $N < 1$ . Этим можно объяснить эффективность применения многопроходного шлифования, выполняемого при  $N \approx 0.01$ , и глубинного шлифования ( $N < 0.001$ ), обеспечивающих увеличение производительности обработки  $Q$  соответственно в 25 и 250 раз.

Глубина шлифования  $t = \frac{Q}{B \cdot V_{дет}}$  с учётом зависимости (13)

определяется

$$t = 0.5 \cdot \frac{H_{\max}^6}{b^2} \cdot R_{кр} \cdot k^2 \cdot \frac{(V_{кр} + V_{дет})^2}{V_{дет}^2} \quad (15)$$

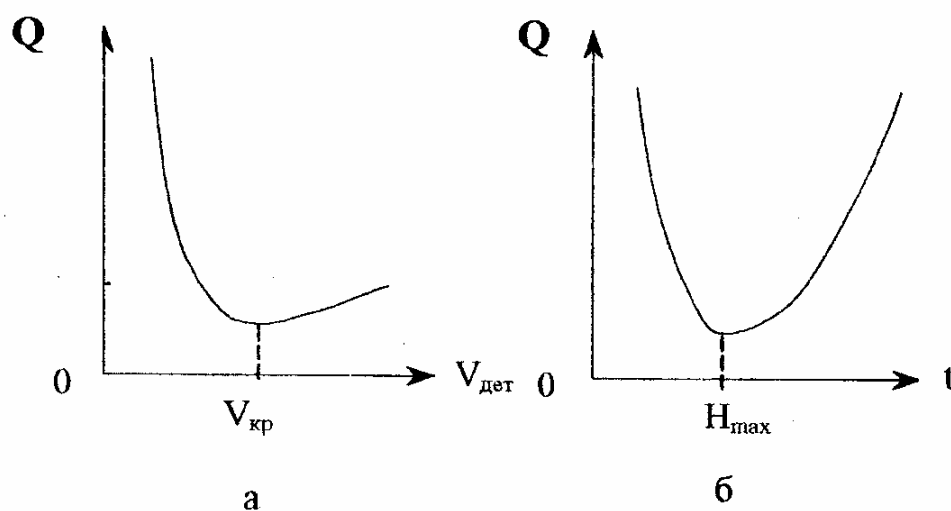
или

$$t = 0.5 \cdot \frac{H_{\max}^6}{b^2} \cdot R_{кр} \cdot k^2 \cdot \frac{(1+N)^2}{N^2} \quad (16)$$

Таблица 4

Расчётные значения $(1+N)^2/N^2$									
$N$	0	0.001	0.01	0.1	1	2	3	4	10
$\frac{(1+N)^2}{N}$	$\infty$	$10^6$	$10^4$	121	4	2.25	1.8	1.6	1.2

Исходя из табл.4, с увеличением  $N$  глубина шлифования  $l$  однозначно уменьшается, причём, более интенсивно в диапазоне  $N < 1$ . При  $N \rightarrow \infty$  соотношение  $(1+N)^2/N^2$  стремится к единице.

Рис. 3. Зависимость  $Q$  от  $V_{дет}$  и  $t$ 

Длина единичного среза  $l$ , определяемая зависимостью

$$l = l_0 \cdot (1+N), \quad (17)$$

при  $N=1$ , т. е. в точке минимума производительности обработки  $Q$ , в два раза больше длины дуги контакта круга с деталью  $l_0$ .

При  $N \rightarrow 0$  ( $V_{дет} \rightarrow 0$ ) справедливо  $l = l_0$ . При  $N \rightarrow \infty$  ( $V_{дет} > V_{кр}$ ) справедливо  $l \rightarrow \infty$ .

Приведенное решение согласуется с решением, полученным с учётом вероятности участка зёрен в резании, рис.3,б [2]. Исходя из рис.3,б, производительность  $Q$  изменяется по экстремальной зависимости, минимум  $Q$  достигается при  $t = H_{max}$ , тогда как в приведённом выше решении – при условии  $V_{дет} = V_{кр}$ . Решение, показанное на рис.3,б, следует рассматривать более точным.

**Список литературы:** 1. Новиков Ф.В., Ткаченко В.П. Условия формирования шероховатостей поверхности при алмазно-абразивной обработке. – Резание и инструмент в технологических системах. – Харьков: ХГПУ, 2001. – Вып.60. – С.171-176. 2. Теоретические основы резания и шлифования материалов: Учеб. пособие / А.В. Якимов, Ф.В. Новиков, Г.В. Новиков, Б.С. Серов, А.А. Якимов – Одесса: ОГПУ, 1999. – 450с.

Поступила в редколлегию 20.04.02.