

## УСЛОВИЯ УМЕНЬШЕНИЯ СИЛЫ И ТЕМПЕРАТУРЫ РЕЗАНИЯ ПРИ ОБЫЧНОМ И ПРЕРЫВИСТОМ ШЛИФОВАНИИ

В работе получены новые аналитические решения об условиях уменьшения силы и температуры резания при обычном и прерывистом шлифовании с учетом процессов резания и трения связки круга с обрабатываемым материалом. Теоретически установлено, что при прерывистом шлифовании в связи с динамическим характером взаимодействия рабочего выступа круга с обрабатываемым материалом фактически отсутствуют упругие перемещения в технологической системе. Это способствует повышению производительности обработки. Температура резания при этом изменяется по экстремальной зависимости с увеличением длины рабочего выступа прерывистого круга, принимая минимальное значение при равенстве длины впадины и рабочего выступа круга.

**Ключевые слова:** прерывистое шлифование, прерывистый круг, сила резания, температура резания

**Введение.** При обработке высокоточных деталей гидроаппаратуры, изготовленных из материалов с повышенными физико-механическими свойствами, постоянно возникает проблема повышения эффективности финишной абразивной обработки, которая, как правило, осуществляется методами обработки свободным абразивом и характеризуется высокой трудоемкостью. В настоящее время появились абразивные круги с новыми характеристиками, позволяющие снизить силовую и тепловую напряженность процесса шлифования, повысить точность и качество обрабатываемых поверхностей. Перспективным направлением следует также рассматривать применение прерывистых кругов, обеспечивающих уменьшение силы и температуры резания. Однако, возможности шлифования этими кругами изучены недостаточно, что требует проведения дополнительных исследований.

**Анализ последних исследований и литературы.** Вопросам прерывистого шлифования в научной технической литературе уделено достаточно большое внимание [1-3]. Профессором Якимовым А.В. [1] теоретически и экспериментально раскрыта физическая сущность условий уменьшения температуры резания при прерывистом шлифовании, благодаря чему этот метод обработки получил достаточно широкое применение на практике. Однако, добиться положительных результатов от использования прерывистого шлифования с точки зрения повышения качества и производительности обработки удается не всегда, в особенности при шлифовании труднообрабатываемых материалов. Поэтому актуальны вопросы теоретического обоснования возможностей снижения силы и температуры резания при прерывистом шлифовании.

**Целью** данной статьи является определение условий уменьшения силы и температуры резания при прерывистом шлифовании на основе применения новых подходов к математическому моделированию процесса шлифования.

**Постановка проблемы.** В работе решается задача теоретического определения силы и температуры резания при обычном и прерывистом шлифовании с

учетом процессов резания и трения связки круга с обрабатываемым материалом.

**Материалы исследований.** Согласно схемы шлифования прямолинейной детали, движущейся по нормали к рабочей поверхности круга со скоростью  $V_{dem}$ , тангенциальную  $P_z$  и радиальную  $P_y$  составляющие силы резания описываются [4]:

$$P_z = \frac{\sigma \cdot F \cdot V_{dem0}}{V_{sp}} + f_1 \cdot c \cdot (V_{dem} - V_{dem0}) \cdot \tau; \quad (1)$$

$$P_y = \frac{\sigma \cdot F \cdot V_{dem0}}{V_{sp}} \cdot \operatorname{tg}(\psi + \gamma) + c \cdot (V_{dem} - V_{dem0}) \cdot \tau, \quad (2)$$

где  $\sigma$  – условное напряжение резания, Н/м<sup>2</sup>;  $F$  – площадь поперечного сечения обрабатываемого прямолинейного образца, м<sup>2</sup>;  $V_{dem0}$  – фактическая линейная скорость съема материала, м/с ( $V_{dem0} \leq V_{dem}$ );  $V_{sp}$  – скорость круга, м/с;  $\psi$  – условный угол трения зерна с обрабатываемым материалом;  $\gamma$  – условный (отрицательный) передний угол зерна;  $c$  – жесткость технологической системы, Н/м;  $f_1$  – коэффициент трения связки круга с материалом.

Исходя из зависимостей (1) и (2), составляющие силы резания  $P_z$  и  $P_y$  с течением времени обработки  $\tau$  неограниченно увеличиваются. Это приводит к снижению точности, качества и производительности обработки.

С учетом аналитической зависимости для определения условного напряжения резания

$$\sigma = \frac{2 \cdot \tau_{сдв}}{\operatorname{tg}\left(45^\circ - \frac{(\psi + \gamma)}{2}\right)}, \quad (3)$$

приведенной в работе [5], зависимости (1) и (2) примет вид:

$$P_z = \frac{2 \cdot \tau_{сдв} \cdot F \cdot V_{dem0}}{\operatorname{tg}\left(45^\circ - \frac{(\psi + \gamma)}{2}\right) \cdot V_{sp}} + f_1 \cdot c \cdot (V_{dem} - V_{dem0}) \cdot \tau; \quad (4)$$

$$P_z = \frac{2 \cdot \tau_{сдв} \cdot F \cdot V_{дем0} \cdot \operatorname{tg}(\psi + \gamma)}{\operatorname{tg}\left(45^\circ - \frac{(\psi + \gamma)}{2}\right) \cdot V_{кр}} + c \cdot (V_{дем} - V_{дем0}) \cdot \tau, \quad (5)$$

где  $\tau_{сдв}$  – предел прочности на сдвиг обрабатываемого материала, Н/м<sup>2</sup>.

Как видно, по мере износа и затупления режущих зерен круга увеличивается их отрицательный передний угол  $\gamma$ , что ведет к фактически неограниченному увеличению составляющих силы резания  $P_z$  и  $P_y$ . Причем, в значительно большей степени радикальной составляющей силы резания  $P_y$ , т.к. зависимость (2) содержит еще и множитель  $\operatorname{tg}(\psi + \gamma)$ , который более интенсивно увеличивается с увеличением угла  $\gamma$ , чем множитель  $\frac{2 \cdot \tau_{сдв}}{\operatorname{tg}\left(45^\circ - \frac{(\psi + \gamma)}{2}\right)}$ . Следовательно,

исходя из такого представления процесса шлифования, в начальный период обработки в зависимостях (1) и (2) будут преобладать первые слагаемые, которые и определяют интенсивное увеличение  $P_z$  и  $P_y$  с увеличением времени обработки  $\tau$ . Затем, через определенное время обработки  $\tau$  вторые слагаемые могут превысить первые слагаемые и увеличение  $P_z$  и  $P_y$  будет происходить за счет увеличения вторых слагаемых. В особой мере это будет проявляться в условиях обычного абразивного шлифования при работе круга в режиме затупления.

Повысить эффективность процесса шлифования можно применением кругов с прерывистой рабочей поверхностью. В связи с прерывистым характером шлифования в начальный момент взаимодействия рабочего выступа круга с обрабатываемым материалом технологическая система не успевает среагировать на импульс силы и получить соответствующее упругое перемещение. Это вытекает из аналитической зависимости для определения амплитуды колебаний от действия кратковременной силы резания без учета диссипативных сил [6]:

$$y = y_{см} \cdot (1 - \cos k\tau), \quad (3)$$

где  $y_{см}$  – статическое перемещение в технологической системе, м;  $k = \sqrt{c/m}$  – собственная частота системы, Гц;  $c$  – жесткость технологической системы, Н/м;  $\tau$  – время обработки, с.

При относительно небольшом значении  $k\tau < \pi/2$  амплитуда колебаний  $y \rightarrow 0$ . В работе [3] показано, что собственная частота упругой системы плоскошлифовального станка принимает значения  $k = 0 \dots 50$  Гц. Время контакта рабочего выступа (длинной  $l_{01} = 20$  мм) прерывистого круга с обрабатываемым материалом при  $V_{кр} = 40$  м/с равно

$$\tau = \frac{l_{01}}{V_{кр}} = \frac{20 \text{ мм}}{40 \cdot 10^3 \text{ мм/с}} = 0,5 \cdot 10^{-3} \text{ с.}$$

Произведение  $k\tau$  для  $k = 300$  Гц равно:  $k\tau = 300 \cdot 0,5 \cdot 10^{-3} \text{ с} = 0,15$ . Период колебаний упругой системы станка

$$T = 2\pi = 6,28. \text{ Тогда } \frac{T}{k\tau} = \frac{6,28}{0,15} = 41,9, \text{ т.е. время кон-}$$

такта рабочего выступа прерывистого круга с обрабатываемым материалом значительно меньше периода колебаний упругой системы станка  $T$ . Следовательно, согласно зависимости (3), величина упругого перемещения  $y$  будет значительно меньше величины  $y_{см}$ . Это будет способствовать более глубокому внедрению зерен в обрабатываемый материал и повышению интенсивности съема материала, что фактически исключит из зависимостей (1) и (2) вторые слагаемые, связанные с возникновением в технологической системе упругих перемещений. Следовательно, при прерывистом шлифовании реализуемы условия  $V_{дем0} \rightarrow V_{дем}$ , что предопределяет постоянство во времени составляющих силы резания  $P_z$  и  $P_y$ .

Необходимо отметить, что при прерывистом шлифовании вследствие более глубокого внедрения режущих зерен в обрабатываемый материал их отрицательный передний угол  $\gamma$  будет меньше, что, согласно зависимостям (4) и (5), приведет к уменьшению составляющих силы резания  $P_z$  и  $P_y$ . Собственно этим и можно объяснить уменьшение силовой напряженности прерывистого шлифования по сравнению с обычным шлифованием. Кроме того, в условиях прерывистого шлифования, в связи с более интенсивным обновлением режущего рельефа круга и увеличением выступления режущих зерен над уровнем связки, уменьшается интенсивность трения связки и зерен с обрабатываемым материалом, т.е. уменьшаются параметры  $\psi$  и  $f_1$ , что приводит к дополнительному уменьшению  $P_z$  и  $P_y$ .

Полученные теоретические решения согласуются с известными экспериментальными данными. Так, в работе [1] установлено, что при обычном абразивном шлифовании деталей из стали X12M абразивным кругом Э9А25СМ2К с течением времени обработки  $\tau$  составляющие силы резания  $P_z$  и  $P_y$  непрерывно увеличиваются, а при прерывистом шлифовании фактически остаются постоянными. Установлено также, что удельный съем металла  $K = Q/P_y$  с течением времени обработки при обычном абразивном шлифовании уменьшается, а при прерывистом шлифовании фактически остается постоянным [1]. Исходя из зависимостей (1) и (2), постоянство составляющих силы резания  $P_z$  и  $P_y$  с течением времени обработки  $\tau$  при прерывистом шлифовании связано с выполнением условия  $V_{дем0} \approx V_{дем}$ , в результате чего вторые слагаемые в зависимостях (1) и (2) фактически равны нулю и поэтому  $P_z$  и  $P_y$  не зависят от  $\tau$ . При обычном абразивном шлифовании выполняется условие  $V_{дем} > V_{дем0}$ , что приводит к увеличению составляющих силы резания  $P_z$  и  $P_y$  с течением времени  $\tau$ .

Температура резания при шлифовании  $\theta$  определяется зависимостью:

$$\theta = \frac{q \cdot l_2}{\lambda} = \left[ \sigma \cdot V_{дем0} + \frac{f_1 \cdot c \cdot (V_{дем} - V_{дем0}) \cdot V_{кр} \cdot \tau}{F} \right] \times \sqrt{\frac{2 \cdot \tau}{c_m \cdot \rho \cdot \lambda}}, \quad (4)$$

где  $q = \frac{P_z \cdot V_{кр}}{F}$  – плотность теплового потока, Вт/м<sup>2</sup>;

$l_2 = \sqrt{\frac{2 \cdot \lambda \cdot \tau}{c_m \cdot \rho}}$  – глубина проникновения возникающе-

го при шлифовании тепла в поверхностный слой обрабатываемой детали, м;  $\lambda$  – коэффициент теплопроводности обрабатываемого материала, Вт/(м·К);  $c_m$  – удельная теплоемкость обрабатываемого материала, Дж/(кг·К);  $\rho$  – плотность материала, кг/м<sup>3</sup>.

Наличие в зависимости (4) второго слагаемого, обусловленного трением связки круга с обрабатываемым материалом, позволяет по-новому раскрыть технологические закономерности изменения температуры резания при шлифовании  $\theta$ . Так, из зависимости (4) следует, что с увеличением параметров  $f_1$ ,  $c$ ,  $(V_{дем} - V_{дем0})$ ,  $V_{кр}$ ,  $\tau$  и уменьшением  $F$  температура резания увеличивается. Это ведет к снижению качества обрабатываемых поверхностей и производительности обработки и согласуется с известными экспериментальными данными.

Из зависимости (4) следует, что уменьшить температуру резания при шлифовании  $\theta$  можно различными путями, например, уменьшая первое и второе слагаемые зависимости (4), а также уменьшая время обработки  $\tau$ . Однако уменьшение параметров  $V_{дем0}$  и  $\tau$  неэффективно, т.к. это ведет к снижению производительности обработки. В связи с этим, основным условием уменьшения температуры резания при шлифовании  $\theta$  следует рассматривать выполнение условия  $V_{дем0} = V_{дем}$  за счет исключения в процессе шлифования трения связки круга с обрабатываемым материалом. Как отмечалось выше, это может быть достигнуто путем применения прерывистого шлифования или эффективных методов правки круга, обеспечивающих его высокую режущую способность.

Температуру резания при прерывистом шлифовании  $\theta$  можно аналитически установить следующим образом. Время контакта рабочего выступа прерывистого круга (длиной  $l_{01}$ ) с обрабатываемым материалом равно  $\tau = l_{01} / V_{кр}$ . Неудаленный материал за время прохождения впадиной прерывистого круга (длиной  $l_{02}$ ) зоны шлифования удаляется последующим рабочим выступом круга с большей скоростью:

$$V_{дем0_1} = V_{дем0} \cdot \frac{(l_{01} + l_{02})}{l_{01}} = V_{дем0} \cdot \left(1 + \frac{l_{02}}{l_{01}}\right). \quad (5)$$

Следовательно, чем больше отношение  $l_{02} / l_{01}$ , тем больше скорость  $V_{дем0_1}$ . Подставляя зависимость (5) в зависимость (4) без учета второго слагаемого и с учетом  $\tau = l_{01} / V_{кр}$ , получено

$$\theta = \sigma \cdot V_{дем0} \cdot \left( \sqrt{l_{01}} + \frac{l_{02}}{\sqrt{l_{01}}} \right) \cdot \sqrt{\frac{2}{c_m \cdot \rho \cdot \lambda \cdot V_{кр}}}. \quad (6)$$

Согласно данной зависимости, увеличение скорости круга  $V_{кр}$  способствует снижению температуры резания при прерывистом шлифовании  $\theta$ . Неодно-

значное влияние на  $\theta$  оказывает длина рабочего выступа прерывистого круга  $l_{01}$ . В связи с этим важно установить характер изменения температуры резания при прерывистом шлифовании  $\theta$  в зависимости от длины  $l_{01}$ . Для этого следует подчинить зависимость (6) необходимому условию экстремума:

$$\theta'_{l_{01}} = \sigma \cdot V_{дем0} \cdot \sqrt{\frac{2}{c_m \cdot \rho \cdot \lambda \cdot V_{кр}}} \cdot (0,5 \cdot l_{01}^{-0,5} - 0,5 \cdot l_{01}^{-1,5} \cdot l_{02}) = 0. \quad (7)$$

Откуда

$$l_{01} = l_{02}. \quad (8)$$

Для определения характера экстремума функции  $\theta$  следует установить знак ее второй производной в точке экстремума, т.е. в точке  $l_{01} = l_{02}$ :

$$\theta''_{l_{01}} = \sigma \cdot V_{дем0} \cdot \sqrt{\frac{2}{c_m \cdot \rho \cdot \lambda \cdot V_{кр}}} \cdot 0,5 \cdot l_{01}^{-1,5}. \quad (9)$$

Как видно, в точке экстремума  $l_{01} = l_{02}$  вторая производная функции  $\theta$  принимает положительное значение. Это указывает на наличие минимума функции  $\theta$  (рис. 1).

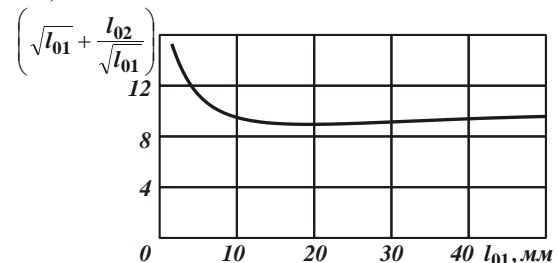


Рис. 1 – Зависимость множителя  $\left(\sqrt{l_{01}} + \frac{l_{02}}{\sqrt{l_{01}}}\right)$  от длины рабочего выступа прерывистого круга  $l_{01}$  для  $l_{02} = 20$  мм

Этим доказана эффективность применения прерывистого шлифования с точки зрения снижения температуры резания при шлифовании  $\theta$ .

**Результаты исследований.** Чтобы оценить истинные технологические возможности прерывистого шлифования, необходимо зависимость (6) представить в виде:

$$\theta = \sigma \cdot V_{дем0} \cdot \left(1 + \frac{l_{02}}{l_{01}}\right) \cdot \sqrt{\frac{2 \cdot \tau}{(2 \cdot n) \cdot c_m \cdot \rho \cdot \lambda}}, \quad (10)$$

где  $n$  – количество рабочих выступов прерывистого круга для  $l_{01} = l_{02}$ .

После преобразований окончательно зависимость (10) выразится:

$$\theta = \sigma \cdot V_{дем0} \cdot \sqrt{\frac{2 \cdot \tau}{(0,5 \cdot n) \cdot c_m \cdot \rho \cdot \lambda}} = \frac{\theta_0}{\sqrt{0,5 \cdot n}}, \quad (11)$$

где  $\theta_0 = \sigma \cdot V_{дем0} \cdot \sqrt{\frac{2 \cdot \tau}{c_m \cdot \rho \cdot \lambda}}$  – температура резания при обычном шлифовании сплошным кругом.

Как видно, зависимость (11) отличается от исходной зависимости (6), справедливой для обычного шлифования сплошным кругом, наличием в знамена-

теле множителя  $(0,5 \cdot n)$ . С увеличением этого множителя температура резания при прерывистом шлифовании  $\theta$  уменьшается, что указывает на целесообразность использования прерывистых кругов. На рис. 2 показан характер изменения  $\theta$  от  $n$ , установленный на основе зависимости (11).

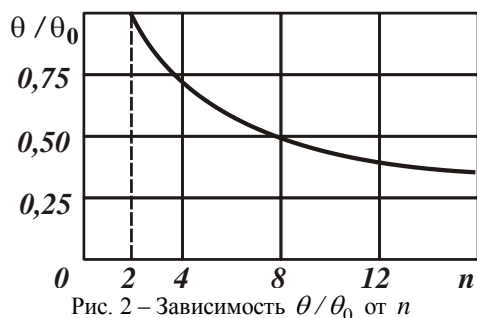


Рис. 2 – Зависимость  $\theta/\theta_0$  от  $n$

Как следует из рис. 2, с увеличением количества рабочих выступов прерывистого круга  $n$  от 2 до 8 отношение  $\theta/\theta_0$  уменьшается в 2 раза, а при изменении  $n$  от 2 до 16 отношение  $\theta/\theta_0$  уменьшается почти в 3 раза по сравнению с обычным шлифованием сплошным кругом. Полученные таким образом расчетные значения отношения  $\theta/\theta_0$  согласуются с экспериментальными данными, приведенными в работе [1], что свидетельствует о достоверности разработанной расчетной схемы температуры резания при прерывистом шлифовании  $\theta$ .

Необходимо отметить, что полученные расчетные значения отношения  $\theta/\theta_0$  справедливы при условии полного охлаждения зоны шлифования за время прерывания процесса шлифования, т.е. за время прохождения впадины прерывистого круга зоны шлифования. Однако, как установлено в работе [1], выполнить на практике данное условие достаточно сложно, т.к. обрабатываемый металл за время прерывания процесса шлифования полностью не охлаждается. Это не позволяет реализовать на практике в полной мере преимущества прерывистого шлифования. Реально удастся уменьшить температуру резания при прерывистом шлифовании  $\theta$  в меньшее количество раз, чем это установлено теоретически. Так, согласно экспериментальным данным, приведенным в работе [3], температура резания при шлифовании  $\theta$  гарантированно может быть уменьшена на 40%. Это составляет достаточно большую величину, позволяющую в ряде случаев (при шлифовании сложнопрофильных поверхностей деталей, изготовленных из труднообрабатываемых материалов) обеспечить качественную обработку. Однако для более радикального решения проблемы снижения температуры резания и повышения качества обработки (исключения прижогов, микротрещин и других температурных дефектов) необхо-

димо обеспечить более существенное уменьшение температуры резания. Поэтому, используя полученное теоретическое решение, после проведения соответствующих исследований можно добиться уменьшения температуры резания  $\theta$  более чем в 2-3 раза (согласно рис. 1).

**Выводы.** В работе получены новые аналитические решения об условиях уменьшения силы и температуры резания при обычном и прерывистом шлифовании с учетом процессов резания и трения связки круга с обрабатываемым материалом. Теоретически установлено, что при прерывистом шлифовании в связи с динамическим характером взаимодействия рабочего выступа круга с обрабатываемым материалом фактически отсутствуют упругие перемещения в технологической системе. Это способствует повышению производительности обработки. Температура резания при этом изменяется по экстремальной зависимости с увеличением длины рабочего выступа прерывистого круга, принимая минимальное значение при условии равенства длины впадины и рабочего выступа круга. За счет этого температура резания может быть уменьшена в 2-3 раза по сравнению с обычным шлифованием.

**Список литературы:** 1. Якимов А.В. Оптимизация процесса шлифования [Текст] / А.В. Якимов. – М.: Машиностроение, 1975. – 176 с. 2. Сипайлов В.А. Тепловые процессы при шлифовании и управление качеством поверхности [Текст] / В.А. Сипайлов. – М.: Машиностроение, 1978. – 167 с. 3. Управление процессом шлифования / А.В. Якимов, А.Н. Паршаков, В.И. Свирщев и др. – К.: Техніка, 1983. – 184 с. 4. Рябенков И.А. Оценка влияния интенсивности трения связки круга с обрабатываемым материалом на эффективность процесса шлифования [Текст] / И.А. Рябенков, Ф.В. Новиков // Вісник НТУ «ХПІ». Збірник наукових праць. Серія: Інноваційні технології та обладнання обробки матеріалів у машинобудуванні та металургії. – Х.: НТУ «ХПІ», 2014. – No 43 (1086). – С. 143–147. 5. Новиков Ф.В. Теоретичні основи механічної обробки високоточних деталей : монографія / Ф.В. Новиков, І.О. Рябенков. – Х. : Вид. ХНЕУ, 2013. – 352 с. 6. Качество и производительность абразивно-алмазной обработки: учеб. пособие [Текст] / А.В. Якимов, Ф.В. Новиков, Г.В. Новиков и др. – Одесса: ОГПУ, 1999. – 212 с.

**Bibliography (transliterated):** 1. Yakimov A.V. Optimizatsiya protsesssa shlifovaniya [Text] A.V. Yakimov. – Moscow: Mashinostroenie, 1975. – 176p. Print. 2. Sipaylov V.A. Teplovye protsessy pri shlifovaniy i upravlenie kachestvom poverkhnosti [Text] V.A. Sipaylov. – Moscow: Mashinostroenie, 1978. – 167 p. Print. 3. Upravlenie protsesssom shlifovaniya [Text] A.V. Yakimov, A.N. Parshakov, V.I. Svirshchv i dr. – Kiev: Tekhnika, 1983. – 184 p. Print. 4. Rybenkov I.A. Otsenka vliyuy intensivnosti treniya svyazki kruga s obrabatyvaemym materialom na effektivnost protsesssa shlifovaniya [Text] / I.A. Rybenkov, F.V. Novikov Visnik NTU «KhPI». Zbirnyk naukovykh prats. Seriya: Innovatsiyni tekhnologiy ta obladnannya obrobki materialiv u mashinobuduvanni ta metalurgiy. – Kiev: NTU «KPI», 2014. – No 43 (1086). – pp. 143–147. Print. 5. Novikov F.V. Teoretychni osnovy mekhanichnoy obrobky vysokotochnykh detaley : monografiya F.V. Novikov, I.O. Ryabenkov. – Kharkov : Vyd. KhNEU, 2013. – 352 p. Print. 6. Kachestvo i proizvoditelnost abrazivno-almaznoy obrabotki: ucheb. Posobie [Text] A.V. Yakimov, F.V. Novikov, G.V. Novikov i dr. – Odessa: OGPU, 1999. – 212 p. Print.

Поступила (received) 28.03.2015

**Новиков Федор Васильевич** – док. техн. наук, проф. ХНЭУ, Харьков, тел.: (057)-695562, e-mail: fokusnic1@rambler.ru;

**Рябенков Игорь Александрович** – канд. техн. наук, ведущий инженер-технолог ГП ХМЗ «ФЭД», Харьков, тел.: (057)-7596631, e-mail: fokusnic1@rambler.ru.

проф. ХНЭУ, Харьков, тел.: (057)-695562, e-mail:

ведущий инженер-технолог ГП ХМЗ «ФЭД», Харьков,