

УДК 621.924.24

С. А. Шияев, кандидат технических наук, доцент;
Ижевский государственный технический университет

А. Г. Иванов, кандидат технических наук, доцент
Ижевская государственная сельскохозяйственная академия

ИССЛЕДОВАНИЕ ПОВЕДЕНИЯ ШЛИФОВАЛЬНОГО СЛОЯ ЛЕНТЫ С УЧЕТОМ УПРУГИХ СВОЙСТВ СВЯЗКИ*

Проанализированы зависимости линейных и угловых колебаний зерна от технологических параметров обработки. Даны сочетания рациональных режимов работы устройства, которые обеспечивают достаточно высокие качество и производительность обработки, сочетающиеся с большой стойкостью ленты.

Ключевые слова: машиностроение, шлифование, проволока, качество, динамика, колебания

В работе [1] представлен вывод аналитических зависимостей на основе уравнений динамики относительного движения абразивной ленты устройства ротационного ленточного охватывающего шлифования, которые позволяют установить критерии и режимы работы устройства, при которых наблюдаемые автоколебания не ухудшают качество поверхности готового изделия.

Кроме указанных явлений, значительный интерес представляет исследование поведения шлифовального слоя ленты с учетом упругих свойств связки устройства ротационного ленточного охватывающего шлифования [2, 3].

Абразивный слой шлифовальной ленты в отличие от шлифовальных кругов обладает существенными эластичными свойствами. При контакте абразивных зерен с обрабатываемым материалом происходят упругие деформации в виде вдавливания абразивного зерна в связку и поворот зерна. После выхода зерна из зоны контакта происходит восстановление (возврат) в исходное состояние под действием сил упругости. Однако при определенных условиях возникающие колебания могут оказать влияние на протекание процесса ленточного шлифования. Рассмотрим динамику этих процессов.

Перемещение зерна определяется двумя обобщенными координатами (рис. 1): x – смещение зерна от положения равновесия под действием силы нормального давления N_0 ; α – угол поворота продольной оси зерна под действием силы резания $F_{\text{рез}}^0$.

Силы N_0 и $F_{\text{рез}}^0$, приходящиеся на одно зерно, можно выразить следующим образом: $N_0 = \frac{P_y}{\langle N \rangle} k$, $F_{\text{рез}}^0 = \frac{P_z}{\langle N \rangle} k$, где $\langle N \rangle$ – среднее число зерен на площади контакта ленты с обрабатываемым изделием; P_z, P_y – соответственно сила прижатия ленты к изделию и сила резания, H ; k – коэффициент неравномерности распределения нагрузки между зернами.

О неравномерности распределения нагрузки свидетельствует неравномерный износ ленты. В данном случае можно принять: $k = 1, 1 \dots 1, 2$.

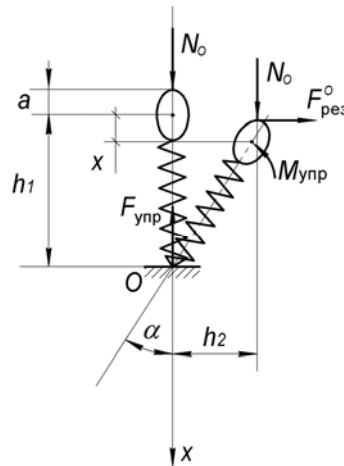


Рис. 1. Схема сил, действующих на абразивное зерно

Кроме указанных сил на зерно действует сила упругости $F_{упр}$ и момент упругости $M_{упр}$ материала связки.

Для системы с двумя степенями свободы составим два дифференциальных уравнения движения:

$$\begin{cases} m\ddot{x} + Cx = N, \\ J\ddot{\alpha} + C_\alpha\alpha = F_{рез} \cdot h_1 + Nh_2, \end{cases} \quad (1)$$

где c — коэффициент жесткости материала связки, Н/м; C_α — коэффициент угловой жесткости зерна, Н · м/рад; h_1, h_2 — плечи сил (рис. 1).

В системе уравнений (1) пренебрегаем диссипативными свойствами материала связки. Однако эти свойства присутствуют, и за счет них не происходит перенос энергии колебаний вне зоны резания.

Во втором уравнении системы (1) определим плечи: h_1 — это высота упругого слоя связки, определяется конструкцией ленты (справочная величина). Размер $h_2 = h_1 \tan \alpha$.

Определим зависимость сил резания от перемещения ленты по дуге охвата проволоки (рис. 2).

Выделим бесконечно малый элемент ленты, который огибает проволоку на дуге $d\beta$. Исходя из принятых обозначений, запишем уравнение динамики в форме Эйлера, т. е. в проекциях на естественные оси координат:

$$d\Phi = dm \cdot a = dm \frac{V^2}{r} = q \cdot r \cdot d\alpha \frac{V^2}{r} = q \cdot V^2 \cdot d\beta,$$

где q — масса одного погонного метра длины ленты, кг/м.

Используем методику, предложенную Эйлером для определения усилий в ленте, получим зависимости сил P_z и P_y от времени [4]:

$$S = (S_1 - qV^2)e^{\mu\beta} + qV^2, \quad S - S_1 = S_1(e^{\mu\beta} - 1) + qV^2(1 - e^{\mu\beta}), \quad \beta = \frac{V}{r}t.$$

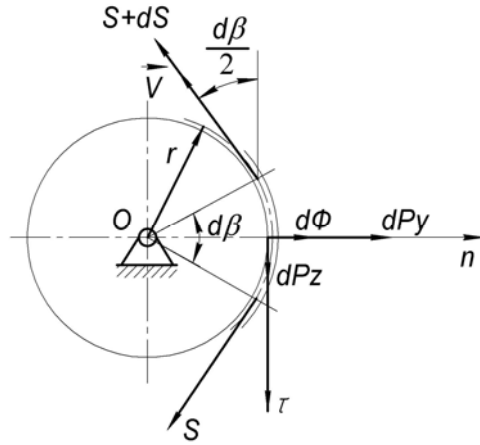


Рис. 2. Схема к определению натяжения ленты по дуге охвата:
 r_n – радиус среднего сечения ленты, м; $P_y = \mu \cdot P_z = f_0 \cdot \tau \cdot P_z$, где μ – коэффициент шлифования; f_0 – коэффициент трения; τ – коэффициент, учитывающий долю силы, идущей на резание; V – скорость ленты, м/с; $S, S + \Delta S$ – натяжение в торцовых сечениях ленты, Н; $d\Phi$ – центробежная сила, Н; dP_y – нормальная реакция проволоки (вертикальная сила), Н; dP_z – сила резания, Н

Следует учесть, что разность сил $S - S_1$ дает силу резания P_z :

$$P_z = S - S_1 = S_1 \left(e^{\mu\beta} - 1 \right) + qV^2 \left(1 - e^{\mu\beta} \right) = S_1 \left(e^{\mu \frac{V}{r} t} - 1 \right) + qV^2 \left(1 - e^{\mu \frac{V}{r} t} \right). \quad (2)$$

Сила натяжения нити при набегании на проволоку S_1 определяется из уравнений статики.

$$P_y = P_z / \mu. \quad (3)$$

Таким образом, силы N_0 и $F_{рез}$, приходящиеся на одно зерно, также будут изменяться по аналогичной зависимости, а уравнения системы (1) примут вид:

$$\begin{cases} m\ddot{x} + Cx = \left[\frac{S_1}{\mu} \left(e^{\mu \frac{V}{r} t} - 1 \right) + qV^2 \left(1 - e^{\mu \frac{V}{r} t} \right) \right] \frac{k}{\langle N \rangle}, \\ J\ddot{\alpha} + C_\alpha \alpha r = \frac{k}{\langle N \rangle} \left[S_1 \left(e^{\mu \frac{V}{r} t} - 1 \right) + qV^2 \left(1 - e^{\mu \frac{V}{r} t} \right) \right] h_1 + \\ + \frac{S_1}{\mu} \left[\left(e^{\mu \frac{V}{r} t} - 1 \right) + qV^2 \left(1 - e^{\mu \frac{V}{r} t} \right) \right] \frac{k}{\langle N \rangle} h_1 \cdot \text{tg} \alpha. \end{cases} \quad (4)$$

Рассмотрим первое уравнение системы (4), которое является линейным неоднородным дифференциальным уравнением второго порядка с постоянными коэффициентами и специальной правой частью. Сделаем обозначения:

$$\left(\frac{S_1}{\mu} - qV^2\right) \frac{k}{\langle N \rangle m} = B, \quad (5)$$

тогда правая часть примет вид: $\left(e^{\frac{\mu V}{r} t} - 1\right) B$, а уравнение преобразуется:

$$\ddot{x} + \frac{C}{m} x = \left(e^{\frac{\mu V}{r} t} - 1\right) B. \quad (6)$$

Решение линейного дифференциального уравнения нашли методом вариации произвольной постоянной, с учетом подстановки $\frac{C}{m} = \omega$ (циклическая частота собственных колебаний системы):

$$x = \frac{B}{\omega^2} \left(\frac{1}{1 + \left(\frac{\mu V}{\omega r}\right)^2} - 1 \right) + A \sin(\omega t + \varphi), \quad (7)$$

где амплитуда A и начальная фаза колебаний φ находятся из начальных условий: при $t_0 = 0$, $x_0 = 0$, $\dot{x}_0 = 0$.

$$A = \frac{B}{\omega^2} \sqrt{\left(\frac{-1}{1 + \left(\frac{\omega V}{\omega r}\right)^2} + 1 \right)^2 + \left(\frac{1}{1 + \left(\frac{\omega V}{\omega r}\right)^2} \frac{\omega V}{\omega r} \right)^2}, \quad \varphi = \pi - \arctg\left(\frac{\mu V}{\omega r}\right).$$

Рассмотрим второе уравнение системы (4)

$$\ddot{\alpha} + \frac{C_{\alpha} r}{J} \alpha = \mu B_1 \left(e^{\frac{\mu V}{r} t} - 1 \right) h_1 + B_1 \left(e^{\frac{\mu V}{r} t} - 1 \right) h_1 \cdot \operatorname{tg} \alpha, \quad (8)$$

где $B_1 = \frac{k}{\langle N \rangle J} \left[\frac{S_1}{\mu} - qV^2 \right]$.

Общее решение искали методом вариации произвольных постоянных:

$$\alpha = C_1(t) \sin(kt) + C_2(t) \cos(kt), \quad \text{где } k = \sqrt{\frac{C_{\alpha} r}{J}} - \text{циклическая частота собственных угловых колебаний; } C_1(t), C_2(t) - \text{некоторые функции от времени.}$$

Решение второго дифференциального уравнения имеет вид, приняв обозначение

$$\frac{B_1 h_1}{k^2} \left(\frac{e^{\frac{\mu V}{r} t}}{1 + \left(\frac{\mu V}{k r}\right)^2} - 1 \right) = p:$$

$$\alpha = p \cdot \mu \left(1 - \frac{v}{kr} \right) - \frac{B_1 h_1}{k^2} \ln \left| \operatorname{tg} \left(\frac{kt}{r} + \frac{\pi}{4} \right) \right| \cos(kt) - \frac{B_1 h_1}{k} \cos(kt) \cdot \int_0^t \frac{e^{\frac{\mu v}{r} t}}{\cos(kt)} dt + A_1 \sin(kt + \varphi_1), \quad (9)$$

где A_1 – амплитуда собственных угловых колебаний зерна, рад; φ_1 – начальная фаза собственных угловых колебаний, рад.

Эти параметры определим из начальных условий. В начальный момент времени $t_0 = 0$, зерно приходит в точку начала шлифования, имеет отклонение $\alpha_0 = 0$ и угловую скорость угловых колебаний $\alpha_0 = \frac{d\alpha}{dt} \Big|_{t_0=0} = 0$.

$$A_1 = \sqrt{p_0^2 \cdot \mu^2 \left(1 - \frac{v}{k^2} \right)^2 + \left(\frac{\frac{B_1 h_1}{k^2} - \dot{p}_0 \mu \left(1 - \frac{v}{k^2} \right)}{k} \right)^2}, \quad \varphi = -\operatorname{arctg} \frac{k p_0 \mu \left(1 - \frac{v}{kr} \right)}{\frac{B_1 h_1}{k^2} - \dot{p}_0 \cdot \mu \left(1 - \frac{v}{kr} \right)}.$$

Усилие S_1 ленты при сбега с проволоки выражается через усилие натяжения P_n натяжного ролика [1]:

$$P_z = \left(P_n \frac{\sqrt{2}}{2} - q V^2 \cdot b \right) (e^{f \cdot \alpha_1} - 1), \quad (10)$$

$$S_1 = \frac{P_z \cdot e^{f \cdot \alpha_1}}{(e^{f \cdot \alpha_1} - 1)} + q V^2 b = P_n \frac{\sqrt{2}}{2} e^{f \cdot \alpha_1} - q V^2 b (e^{f \cdot \alpha_1} - 1), \quad (11)$$

где f – коэффициент трения сцепления между шкивом и лентой; $\alpha_1 = 135 + \beta$,

$\beta = \arcsin \frac{r + r_n}{R}$, (r – радиус роликов, м; R – радиус планшайбы, м).

В результате обработки полученных зависимостей были построены графики линейных и угловых колебаний зерна в зависимости от технологических параметров обработки. Некоторые зависимости приведены на рис. 3 и 4.

Анализ диаграмм движения зерна в связке при обработке проволоки диаметром 5 мм показывает следующее: при увеличении силы P_n натяжения ленты роликом, при неизменных условиях, увеличивается амплитуда линейных и угловых колебаний зерна, достигая недопустимых значений при силе P_n больше 90 Н. При больших значениях натяжения происходит выкрашивание зерен, снижается стойкость ленты. Внедрение зерен в обрабатываемый материал проволоки достигает максимального значения, что сказывается на увеличении величины шероховатости. При скоростях менее 15–16 м/с производительность процесса шлифования снижается.

Обращает на себя внимание особенность графиков линейных колебаний (не показаны) при скоростях ленты более 18 м/с. Малое усилие натяжения P_n ролика приводит к парадоксальному результату: линейное смещение зерна происходит в сторону внедрения его в металл, а не в связку ленты. Это можно объяснить следующим образом. Лента огибает проволоку по малому радиусу кривизны (0,5–2,5 мм, в зависимости от диаметра проволоки), испытывает значительные центробежные

силы инерции, которые зависят от квадрата скорости. Эти силы, в указанном диапазоне скорости, начинают превалировать над силами натяжения ленты и отжимают ее от проволоки. Подобные режимы обработки недопустимы, так как в этом случае процесса шлифования не наблюдается.

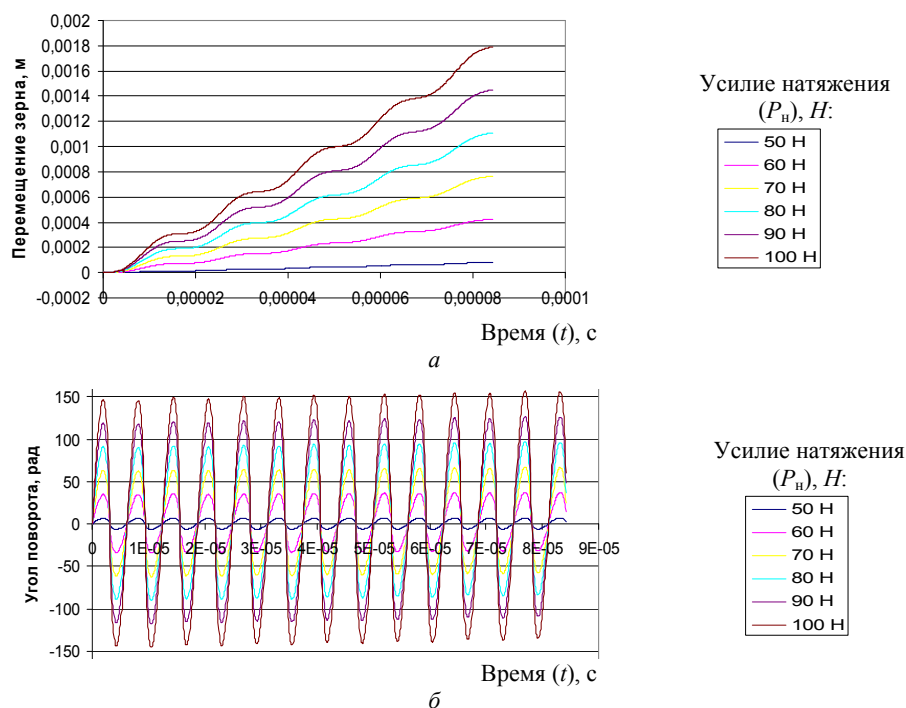


Рис. 3. Графики линейных (а) и угловых (б) колебаний зерна в зависимости от технологических параметров обработки при скорости абразивной ленты 18 м/с и зернистости абразивной ленты 40H, материал зерен электрокорунд

Можно рекомендовать для увеличения производительности процесса шлифования сочетание увеличения скорости ленты с одновременным увеличением силы натяжения P_n ролика. Например, при скорости $V_n = 18$ м/с и силе $P_n = 60$ Н максимальное смещение зерна $x = 0,45$ мкм, а для скоростей $V_n = 19-20$ м/с такие смещения наблюдаются при силе $P_n = 70$ Н.

В целом можно рекомендовать следующее сочетание рациональных режимов работы устройства, которые обеспечивают достаточно высокую производительность, сочетающуюся с большой стойкостью ленты: $V_n = 17-20$ м/с, $P_n = 50-70$ Н.

Отметим, что резонансных явлений в колебаниях зерна не наблюдается. Частота собственных колебаний зерна зависит от размеров зерна и жесткости связки. Строго говоря, жесткость связки зависит от натяжения ленты и достигает максимума

при удельном натяжении в ленте $\frac{H_o}{b} = 5 \div 7 \frac{\text{кг}}{\text{см}} = 5 \div 7 \frac{\text{кН}}{\text{м}}$ [5]. При работе рассмат-

риваемого устройства характерны мягкие режимы обработки (финишные операции), поэтому удельные натяжения в ленте, приходящиеся на единицу ширины

в ленте, имеют существенно меньшие значения: $\frac{H_o}{b} = \frac{S}{b} = \frac{70 \text{ Н}}{0,1 \text{ м}} = 700 \frac{\text{Н}}{\text{м}} = 0,7 \frac{\text{кН}}{\text{м}}$.

В этом случае можно пренебречь влиянием изменения натяжения ленты при огибании проволоки на жесткость связки. Были получены следующие результаты: частота собственных колебаний зерна изменяется в пределах 140–250 кГц для зернистости 40 Н (электрокорунд) до 600–800 кГц для зернистости 5 М (алмаз), что, в свою очередь, хорошо согласуется с результатами, полученными в работе [5]. С другой стороны, частота вынужденных колебаний ω определяется скоростью ленты, радиусом огибания проволоки и коэффициентом шлифования $\mu \left(\omega = \mu \frac{V}{r} \right)$. При ис-

следуемых режимах ($V_{\text{л}} = 18 \text{ м/с}$, $r = 0,0005\text{--}0,0025 \text{ мм}$, $\mu = 0,7$) получены следующие значения $\omega = 5,040\text{--}36,2 \text{ кГц}$.

На графиках (рис. 4) показано влияние поперечного сечения проволоки (радиус проволоки) на колебания зерен и, следовательно, на шероховатость поверхности. Амплитуды и частоты линейных и угловых колебаний не зависят от размеров проволоки, но с уменьшением радиуса уменьшается площадь охвата лентой проволоки. В зоне контакта уменьшается количество зерен, а сами они взаимодействуют с обрабатываемой поверхностью существенно меньшее время. Можно ожидать некоторого снижения качества обработки поверхности, что подтверждается экспериментальными данными.

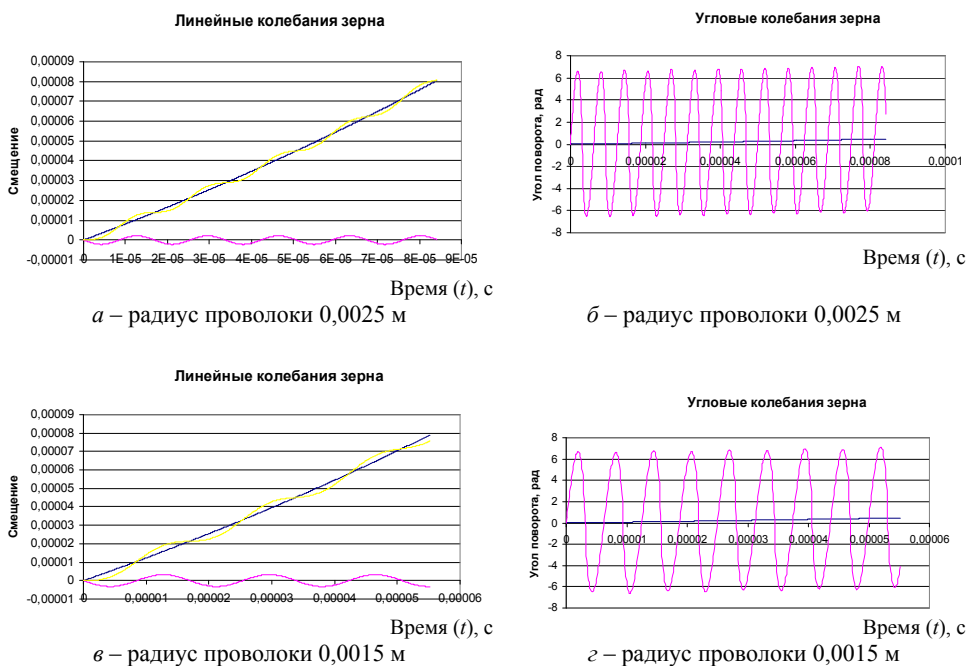


Рис. 4. Колебания абразивного зерна в зависимости от радиуса проволоки при зернистости абразивной ленты 40 Н, скорость ленты 18 м/с, усилие натяжения 50 Н, материал зерен электрокорунд

Для малых сечений проволоки необходимо выбирать «мягкие» режимы резания с уменьшением силы натяжения натяжного ролика до значения $P_n = 40\text{--}50\text{ Н}$.

Для получения полированной поверхности проволоки следует применять шлифовальные ленты с алмазными зёрнами зернистостью порядка 5 М. Картина колебаний алмазных зёрен повторяет колебания зёрен электрокорунда, однако количественно частота колебаний значительно выше (при скорости ленты $V_l = 18\text{ м/с}$, $k = 600\text{--}800\text{ кГц}$), а амплитуда линейных колебаний не превышает 0,1 мм. При этом сами колебания зёрен оказываются существенно меньше величины поджатия ленты за счёт огибания проволоки. Угловые колебания зёрен не превышают $\pm 30^\circ$ при скорости ленты $V_l = 18\text{ м/с}$. Колебания несущественно зависят от величины силы натяжения, однако с увеличением силы натяжения ролика P_n происходит снижение частоты колебаний.

Рассматриваемые колебания зёрен различным образом влияют на шероховатость поверхности проволоки. Линейные колебания зёрен создают на поверхности проволоки микронеровности, которые снижают качество обработки. Следует выбирать режимы обработки с незначительными амплитудами линейных колебаний.

Угловые колебания зёрен оказывает положительное влияние на качество шероховатой поверхности. Вследствие этих колебаний различные участки рабочей поверхности зёрен участвуют в работе, что способствует самоочистке и самозатачиванию зёрна. Засаливания зёрен не происходит. Однако указанный положительный эффект наблюдается при амплитудных значениях угловых смещений $-50^\circ \leq \alpha \leq +50^\circ$. При больших значениях углов поворота продольной оси зёрен происходит разрушение связки, зёрна вырывают с поверхности шлифовальной ленты.

Таким образом, можно сделать вывод: для закрепления зёрен на рабочей поверхности шлифовальной ленты следует использовать упругие материалы связки, которые способствуют уменьшению амплитуды линейных колебаний за счёт увеличения жесткости связки. При этом амплитуда угловых колебаний не должна превышать $40\text{--}50^\circ$.

Список литературы

1. Шилиев С. А., Иванов А. Г. Исследование динамики относительного движения абразивной ленты устройства ротационного охватывающего ленточного шлифования // Вестн. ИжГТУ. – 2009. – № 3. – С. 46–50.
2. Шилиев С. А. Автоматическая линия для ротационного охватывающего ленточного шлифования длинномерных заготовок малого диаметра // Вестн. машиностроения. – 2009. – № 4. – С. 71–74.
3. Пат. 2228831 Российская Федерация, 7В24В 21/02. Ленточно-шлифовальный станок / Шилиев С. А., Свитковский Ф. Ю., Иванова Т. Н. ; заявл. 25.07.02 ; опубл. 20.05.04, Бюл. № 14.
4. Гузенков П. Г. Детали машин : учеб. для машиностроит. специальностей вузов. – М. : Высш. шк., 1968. – 464 с.
5. Пузанов В. В., Галашев В. А. К вопросу об изучении упругих свойств шлифовально-полировального инструмента // Совершенствование процессов обработки металлов резанием : межвуз. сб. / Удмурт. гос. ун-т, Ижев. мех. ин-т. – Ижевск : [б. и.], 1976. – Вып. 1. – С. 15–23.

* * *

S. A. Shilyaev, Candidate of Technical Sciences, Associate Professor, Izhevsk State Technical University

A. G. Ivanov, Candidate of Technical Sciences, Associate Professor, Izhevsk State Agricultural Academy

Research of band grinding layer subject to elastic properties of adhesive

The analysis of dependence of linear and angular oscillations of grain on the technological processing parameters is presented. It introduces the combinations of rational operational modes of the device that provides quite high enough quality and processing capacity that are compatible with long wearing of a grinding band.

Keywords: mechanical engineering, grinding, wire, quality, dynamics, oscillations

Получено 12.10.10

УДК 621.002.5

А. И. Шияев, аспирант;

К. П. Широбоков, кандидат технических наук, доцент

Воткинский филиал Ижевского государственного технического университета

МЕТОДИКА КОНТРОЛЯ ПРОЦЕССА ПОЛУЧЕНИЯ БАЗАЛЬТОВОГО ВОЛОКНА ДУПЛЕКС-СПОСОБОМ

Представлена система контроля, позволяющая назначать такие параметры технологического процесса, при которых не образуется неволокнистых включений.

Ключевые слова: базальтовое волокно, неволокнистые включения, контроль параметров технологического процесса

Обеспечение высокого качества базальтового волокна с минимальным содержанием неволокнистых включений и конкурентоспособности изделий из него возможно только при условии строгого соблюдения технологической дисциплины. Исследования и расчеты показали, что одной из причин образования неволокнистых включений является нестабильность диаметра первичных нитей [1], вызванная, например неравномерностью уровня расплава базальта над фильерным питателем. Причиной образования неволокнистых включений является также неравномерность распределения первичных нитей по ширине щелевого сопла, приводящая к контакту соседних нитей между собой. На участке движения первичных нитей от механизма вытягивания до щелевого сопла на них действует сила трения, направленная вдоль нитей. Сила трения определяется аэродинамической силой, действующей на внедренную в газовый поток часть нити и коэффициентом трения в месте контакта с опорной щекой. Знание процессов образования неволокнистых включений и устранение указанных выше причин позволяют назначать такие параметры технологического процесса, при которых вероятность образования включений будет минимальна. Разработанные и известные на сегодняшний день технические средства для контроля параметров технологического процесса производства базальтового волокна дуплекс-методом позволяют производить измерение уровня расплава в плавильной печи [2], измерять и управлять диаметром первичной нити [3], которая оказывает наибольшее влияние на устойчивость первичной нити [4], позволяют поддерживать эти параметры в требуемых пределах.

Схема методики контроля процесса получения изделий из базальтового волокна на примере получения холстов из супертонкого волокна приведена на рисунке.