

*Шрубченко И. В., д-р техн. наук, проф.,
Мурыгина Л. В., аспирант,
Рыбалко В. Ю., аспирант,
Щетинин Н. А., аспирант*

Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова

ОПТИМИЗАЦИЯ РЕЖИМОВ ОБРАБОТКИ БАНДАЖЕЙ НА СПЕЦИАЛЬНОМ СТЕНДЕ

shrubens@yandex.ru

Для вычисления оптимальных режимов обработки при реконструкции бандажей плавающего типа во вварные на специальном стенде, представлена математическая модель оптимизации процесса формирования поверхностей с использованием метода линейного программирования.

Ключевые слова: бандаж, кольцевые, фасонные проточки, специальный стенд, мобильное оборудование, математическая модель, режимы резания, линейное программирование, оптимизируемые параметры, вводимые ограничения.

В настоящее время для оснащения крупногабаритных технологических барабанов применяют два вида бандажей: «плавающего» типа и «вварного» типа. На кафедре технологии машиностроения БГТУ им. В.Г.Шухова разработана новая конструкция бандажей «вварного» типа [1], которые можно получить путем реконструкции бандажей плавающего типа. Она достигается путем проточки специальных фасонных канавок и формирования поверхностей закрылков на торцовых поверхностях бандажей.

Для выполнения таких видов работ может быть использована мобильная технология [2], когда обработка осуществляется непосредственно в условиях эксплуатации на специальном стенде с использованием переносного станка (рис. 1).

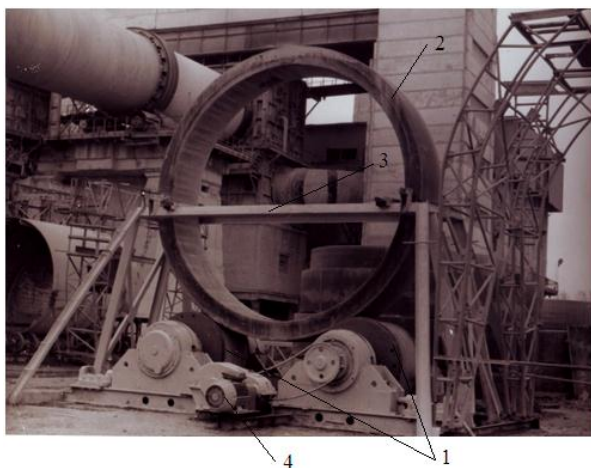


Рис. 1. Специальный стенд для обработки поверхностей бандажей

На опорные ролики 1 специального стенда устанавливают бандаж 2 и его вращение осуществляется за счет сил трения, возникающих между бандажом и приводным роликом. Привод вращения осуществляется от двигателя постоянного тока 4, через понижающий редуктор и

цепную передачу. Для предотвращения возможных осевых смещений бандажа в процессе обработки предусмотрена система упоров 3. Переносной станок базируется на раме специального стенда, непосредственно под бандажом таким образом, чтобы стойка с поперечным суппортом располагалась со стороны обрабатываемого торца. Такая схема обработки имеет ряд существенных отличий от обработки бандажей непосредственно на работающем технологическом барабане. К таким отличительным особенностям можно отнести:

- более широкий диапазон изменения частоты вращения – от 0 до 2,14 об/мин;
- вращение обрабатываемого изделия осуществляется за счет силы трения, возникающей между бандажом и опорно-приводным роликом;
- масса обрабатываемого изделия оказывается значительно меньше, чем для условий обработки непосредственно на работающем технологическом барабане;
- силы резания при проточке канавки оказываются существенно больше, чем при обработке других поверхностей бандажа.

При формировании кольцевой проточки на торцевой поверхности бандажа, возникающие силы резания могут превысить силу трения между поверхностями качения бандажа и опорно-приводного ролика, что может повлечь за собой либо осевое смещение бандажа, либо пробуксовывание опорно-приводного ролика, либо два этих эффекта одновременно. Применяемая здесь бесцентровая схема обработки также требует задания геометрических и технологических параметров в строго определенных пределах. Таким образом, возникает необходимость в оптимизации режимов обработки для такой схемы, с учетом ее особенностей.

Оптимизацию процесса обработки можно

осуществить методом линейного программирования. Очевидно, что математическая модель, будет представлять собой некоторую совокупность неравенств, которые будут показывать связь варьируемых параметров и соответствующих вводимых ограничений. В качестве таких ограничений должны быть введены геометрические и технологические параметры технологической системы. Анализ предложенной схемы обработки показывает, что наибольшее влияние на возникающие силы резания будут оказывать частота вращения бандажа и глубина резания. Поэтому их и следует использовать в качестве варьируемых параметров.

В качестве ограничений следует ввести:

– ограничение по допустимой составляющей силы резания P_z , определяющей тяговую силу, развиваемую приводом вращения бандажа;

– ограничение по допустимой составляющей силы резания P_z , определяющей возможные проскальзывания (пробуксовывание) приводного опорного ролика;

– ограничение по допустимой составляющей силы резания P_x , определяющей возможные осевые смещения бандажа по поверхностям качения опорных роликов;

– ограничение по минимально и максимально допустимой величине глубины резания, обеспечивающей формирование поверхностей закрывков в пределах допуска при их бесцентровой обработке;

– ограничение по допустимой величине отжаты в технологической системе;

– ограничение по допустимой жесткости режущего инструмента;

– ограничение по допустимой величине формируемой шероховатости поверхности;

$$x_z \cdot \ln(t) + (n_z + 1) \cdot \ln(n) < \ln \left(\frac{N_{привода} \cdot 1000^{n_z+1} \cdot 1020 \cdot 60}{10 \cdot C_p \cdot s^{y_z} \cdot k_p \cdot (\pi D)^{n_z+1} \cdot K} \right).$$

Принимаем:

$$\ln(t) = x_1; \quad \ln(n) = x_2;$$

$$\ln \left(\frac{N_{привода} \cdot 1000^{n_z+1} \cdot 1020 \cdot 60}{10 \cdot C_p \cdot s^{y_z} \cdot k_p \cdot (\pi D)^{n_z+1} \cdot K} \right) = b_1.$$

В результате замены ограничение по допустимой составляющей силы резания P_z , определяющей тяговую силу, развиваемую приводом вращения бандажа, принимает вид:

$$x_z \cdot x_1 + (n_z + 1) \cdot x_2 < b_1;$$

– ограничение по допустимой составляющей силы резания P_z , определяющей возмож-

– ограничение по минимальной и максимальной величине частоты вращения бандажа, определяемой характеристиками привода;

– ограничение по допустимой прочности режущего инструмента.

Для построения математической модели необходимо установить зависимости варьируемых параметров от вводимых ограничений:

– ограничение по допустимой составляющей силы резания P_z , определяющей тяговую силу, развиваемую приводом вращения бандажа на специальном стенде. Этим ограничением устанавливается взаимосвязь мощности, затрачиваемой на процесс резания, и мощности привода вращения бандажа,

$$N_{рез} < N_{привода}$$

$$N_{рез} = \frac{P_z \cdot V \cdot K}{1020 \cdot 60};$$

$$P_z = 10 \cdot C_p \cdot t^{x_z} \cdot s^{y_z} \cdot V^{n_z} \cdot k_p;$$

$$V = \frac{\pi \cdot D \cdot n}{1000},$$

где $C_p = 300$, $k_p = 0,93$, $x_z = 1$, $y_z = 0,75$, $n_z = -0,15$ – коэффициенты, зависящие от условий резания (материал режущей части резца – твердый сплав; вид обработки – наружное продольное и поперечное точение и растачивание; главный угол в плане $\varphi = 45^\circ$; передний угол $\gamma = -10^\circ$; угол наклона главного лезвия $\lambda = 0^\circ$ [3]); $K = 1,25 \dots 2,0$ – коэффициент запаса.

Таким образом, получаем следующее техническое ограничение, преобразованное к линейному виду:

ные проскальзывания (пробуксовывание) опорно-приводного ролика.

Данное ограничение устанавливает взаимосвязь между составляющей силы резания P_z и окружной силой F_t , передаваемой бандажу за счет силы трения F_f (рис. 2).

Условие осуществления вращения можно выразить следующей зависимостью:

$$k \cdot F_t = F_f = f \cdot F_n,$$

где $k = 1,3 \dots 1,4$ – коэффициент запаса сцепления; $f = 0,15$ – коэффициент трения пары сталь-сталь; F_n – нормальная составляющая, действу-

ющая на опорно-приводной ролик со стороны бандажа.

$$F_n = M \cdot 4,9 \cdot \cos 30^\circ = 237637H ,$$

где $M = 56000$ кг – масса бандажа.

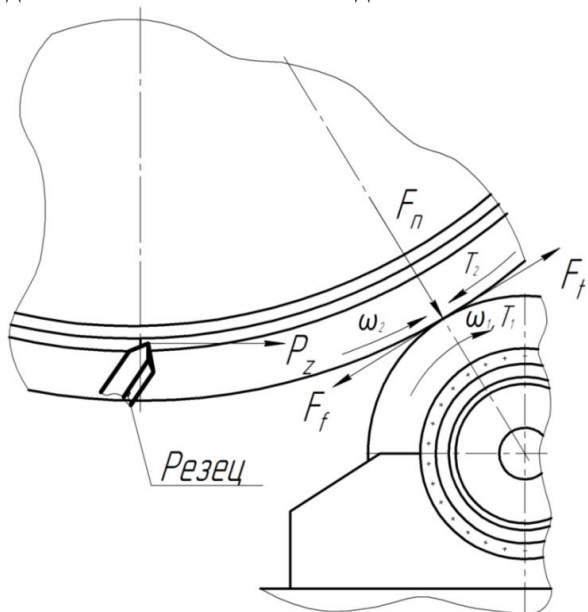


Рис. 2. Расчетная схема привода вращения бандажа

Таким образом, условие обработки без проскользывания, будет иметь вид:

$$P_z < F_t,$$

$$P_z < \frac{f \cdot F_n}{k},$$

где P_z – тангенциальная составляющая силы резания.

Подставляя полученные формулы в неравенство и производя некоторые математические преобразования, получаем:

$$x_z \cdot \ln(t) + n_z \cdot \ln(n) < \ln \left(\frac{1000^{n_z} \cdot F_n \cdot f}{10 \cdot (\pi D)^{n_z} \cdot C_p \cdot s^{y_z} \cdot k_p \cdot k} \right).$$

Производя замену аналогично предыдущему пункту, получаем техническое ограничение в следующем виде:

$$x_z \cdot x_1 + n_x \cdot n_2 < b_2;$$

– ограничение по допустимой составляющей силы резания P_x , определяющей возможные осевые смещения бандажа по поверхностям качения опорных роликов.

Данное ограничение устанавливает взаимосвязь между составляющей силы резания P_x и силой трения F_f , которая препятствует осевому смещению бандажа. Так как базирование бандажа осуществляется на двух роликах, то сила трения увеличивается в два раза. На рис. 3 представлена расчетная схема для данного ограничения.

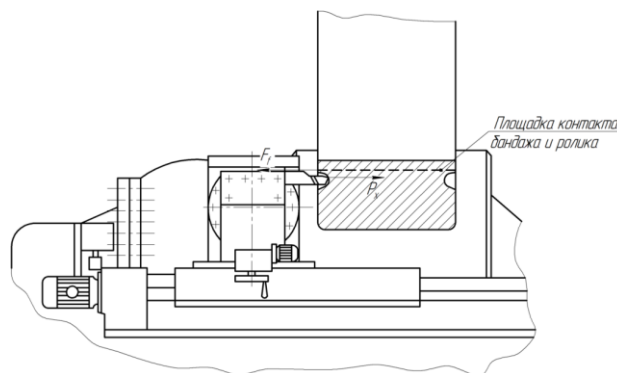


Рис. 3. К определению возможных осевых смещений бандажа

Ограничение здесь будет иметь вид:

$$P_x < F_f,$$

где P_x – осевая составляющая силы резания;

$$P_x = 10 \cdot C_p \cdot t^{x_x} \cdot s^{y_x} \cdot V^{n_x} \cdot k_p,$$

где $C_p = 339$, $k_p = 1,48$, $x_x = 1$, $y_x = 0,5$, $n_x = -0,4$ – коэффициенты, зависящие от условий резания (материал режущей части резца – твердый сплав; вид обработки – наружное продольное и поперечное точение и растачивание; главный угол в плане $\varphi = 45^\circ$; передний угол $\gamma = -10^\circ$; угол наклона главного лезвия $\lambda = 0^\circ$ [3]); F_f – сила трения, возникающая между бандажом и роликами;

$$F_f = 2 \cdot f \cdot F_n,$$

где $f = 0,15$ – коэффициент трения скольжения для пары сталь-сталь.

Подставляя полученные зависимости в неравенство и производя соответствующие математические преобразования, получаем:

$$x_x \cdot \ln(t) + n_x \cdot \ln(n) < \ln \left(\frac{1000^{n_x} \cdot F_n \cdot f \cdot 2}{10 \cdot (\pi D)^{n_x} \cdot C_p \cdot s^{y_x} \cdot k_p} \right).$$

$$x_x \cdot x_1 + n_x \cdot x_2 < b_3,$$

– ограничение по минимально и максимально допустимой величине глубины резания, обеспечивающей формирование поверхностей закрылков в пределах допуска, при их бесцентровой обработке.

Ранее проведенные исследования по бесцентровой обработке [4, 5], показывают, что такие параметры как: глубина резания, межосевой размер опорных роликов и угловое положение обрабатываемого инструмента, оказывают существенное влияние на процесс формирования поверхности. На рис. 4 представлена диаграмма зависимости величины уточнения от глубины резания и межосевого размера опорных роликов

для условий обработки бандажа с исходной погрешностью в виде 4-х гармоник. Анализ такой диаграммы позволяет установить минимальное и максимальное значения глубины резания, при которых обработка поверхности происходит с исправлением формы.

Таким образом, для исследуемой системы можно ввести ограничение по минимально и максимально допустимой величине глубины резания, которое зададим в виде двух неравенств:

$$x_1 \geq b_4;$$

$$x_1 \leq b_5,$$

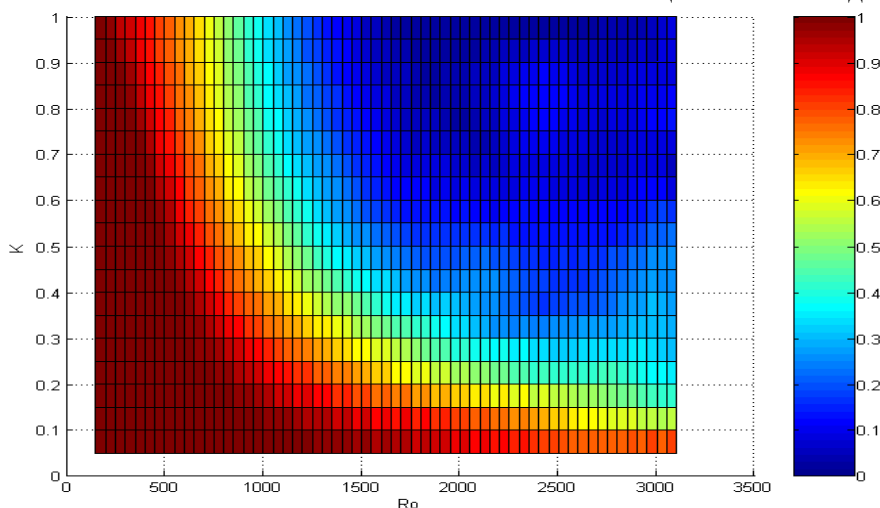


Рис. 4. Диаграмма зависимости уточнения от глубины резания и межребрового размера роликов при обработке бандажа (исходная погрешность с четырьмя гармониками)

Связь варьируемых параметров и жесткости технологической системы можно получить из формулы определения отжатый элементов станка, возникающих под действием составляющей силы резания P_y :

$$\Delta_y = \frac{P_y}{j};$$

$$P_y = 10 \cdot C_p \cdot t^{x_y} \cdot s^{y_y} \cdot V^{n_y} \cdot k_p,$$

где $C_p = 243$, $k_p = 1,48$, $x_y = 0,9$, $y_y = 0,6$, $n_y = -0,3$ – коэффициенты, зависящие от условий резания [3]; $j = 90000$ Н/мм – жесткость технологической системы. Максимально допустимая величина отжатый в технологической системе также не должна превышать допуска на погрешность формы поверхностей формируемого закрылка, т. е. -3 мм.

В результате преобразований получаем следующее техническое ограничение:

$$t^{x_y} \cdot n^{n_y} \leq \frac{\Delta_y \cdot j \cdot 1000^{n_y}}{10 \cdot C_p \cdot s^{y_y} \cdot k_p \cdot (\pi D)^{n_y}}.$$

Произведя соответствующие преобразования, получаем ограничение по жесткости техно-

где $x_1 = \ln(t)$, $b_4 = \ln(t_{\min})$, $b_5 = \ln(t_{\max})$;

– ограничение по допустимой величине отжатый в технологической системе специального станда. Жесткость технологической системы безусловно оказывает существенное влияние на точность формируемой поверхности. Это особенно актуально для бесцентровой схемы обработки. При использовании специального станда, оснащаемого мобильным оборудованием, существенное влияние на величину отжатый очевидно будут оказывать элементы самого станка, т.к. их жесткость значительно меньше по сравнению с элементами специального станда.

логической системы:

$$x_y \cdot x_1 + n_y \cdot x_2 \leq b_6;$$

– ограничение по допустимой жесткости режущего инструмента.

Это ограничение устанавливает взаимосвязь между глубиной резания, частотой вращения бандажа и жесткостью режущего инструмента. Максимальная нагрузка, допускаемая жесткостью реза, определяется по формуле:

$$P_{ж.доп.} = \frac{3 \cdot f_1 \cdot E \cdot I_m}{l_{6.p.}^3},$$

где $f_1 = 0,1$ – допустимая стрела прогиба для черногого точения, мм; E – модуль упругости материала реза, $E = (2...2,5) \cdot 10^5$ МПа; I – момент инерции державки реза, мм⁴ (для прямоугольного сечения державки шириной $B_\partial = 15...40$ мм и высотой $H_\partial = 15...60$ мм,

$$I = \frac{B_\partial \cdot H_\partial^3}{12}).$$

Из условий соотношения окружной составляющей P_z и максимальной нагрузки, допускаемой жесткостью реза, имеем:

$$P_z \leq P_{ж.доп.};$$

$$t^{x_z} \cdot n^{n_z} \leq \frac{3 \cdot f \cdot E \cdot B_\delta \cdot H_\delta^3 \cdot 1000^{n_z}}{120 \cdot C_z \cdot s^{y_z} \cdot k_z \cdot l_{\text{в.р.}}^3 \cdot (\pi D)^{n_z}};$$

$$x_z \cdot x_1 + n_z \cdot x_2 \leq b_7,$$

– ограничение по допустимой шероховатости формируемой поверхности. Это ограничение устанавливает взаимосвязь между варьируемыми параметрами и шероховатостью поверхности.

В соответствии с ОСТ 22-170-87, шероховатость обрабатываемых поверхностей бандажа должна быть в пределах – 6,3...12,5 Ra. Величину микронеровностей для условий токарной обработки можно оценить по следующей зависимости:

$$Ra = k_0 \cdot \frac{s^{k_1} \cdot (90 + \gamma)^{k_4}}{r^{k_2} \cdot V^{k_3}},$$

где $\gamma = -10^0$ – при работе по корке, при обработке материала с неметаллическими включениями, при работе с ударом; $r = 0,5...2$ мм – параметры геометрии режущей части инструмента;

$k_0 = 41,8, k_1 = 0,75, k_2 = 0,55, k_3 = 1,38, k_4 = 0,25$ (при обработке стали 20, [3]).

После преобразования данного выражения, с учетом условий обеспечения требуемого параметра шероховатости, получаем:

$$n^{k_3} \leq \frac{k_0 \cdot s^{k_1} \cdot (90 + \gamma)^{k_4} \cdot 1000^{k_3}}{Ra \cdot r^{k_2} \cdot (\pi D)^{k_3}}.$$

В итоге, техническое ограничение по допустимой шероховатости поверхности будет иметь вид:

$$k_3 \cdot x_2 \leq b_8$$

– ограничение по минимальной и максимальной величине частоты вращения бандажа при обработке на специальном стенде. Это ограничение будет зависеть от характеристик привода специального стенда и его можно представить в виде двух неравенств:

$$x_2 \geq b_9;$$

$$x_2 \leq b_{10},$$

где $x_2 = \ln(n)$, $b_9 = \ln(n_{\min})$, $b_{10} = \ln(n_{\max})$;

– ограничение по допустимой прочности режущего инструмента.

Данное ограничение устанавливает взаимосвязь варьируемых параметров с прочностью режущего инструмента. Предел прочности материала резца при изгибе определяется зависимостью:

$$\sigma_u \geq \frac{M_{u_{3z}} \cdot k_{3.n.}}{W},$$

где $M_{u_{3z}}$ – изгибающий момент в месте закрепления державки резца на расстоянии $l_{\text{в.р.}}$

$$M_{u_{3z}} = P_z \cdot l_{\text{в.р.}},$$

где $l_{\text{в.р.}} = 10...140$ мм – вылет резца от точки приложения окружной силы; $k_{3.n.} = 2,4$ – коэффициент запаса прочности; W – момент сопротивления державки резца, мм³ (для прямоугольного сечения державки шириной $B_\delta = 15...40$ мм и высотой $H_\delta = 15...60$ мм –

$W = \frac{B_\delta \cdot H_\delta^2}{6}$). После преобразования получаем:

$$t^{x_z} \cdot n^{n_z} \leq \frac{240 \cdot B_\delta \cdot H_\delta^2 \cdot 1000^{n_z}}{60 \cdot C_z \cdot s^{y_z} \cdot k_z \cdot l_{\text{в.р.}} \cdot k_{3.n.} \cdot (\pi D)^{n_z}}.$$

Логарифмируя и производя замену, получаем техническое ограничение по прочности режущего инструмента, преобразованное к линейному виду:

$$x_z \cdot x_1 + n_z \cdot x_2 \leq b_{11}.$$

Таким образом, математическая модель для оптимизации процесса обработки кольцевых фасонных проточек и формирования закрылков при реконструкции бандажа плавающего типа во вварной, будет иметь вид:

$$x_z \cdot x_1 + (n_z + 1) \cdot x_2 < b_1$$

$$x_z \cdot x_1 + n_z \cdot x_2 < b_2$$

$$x_x \cdot x_1 + n_x \cdot x_2 < b_3$$

$$x_1 \geq b_4$$

$$x_1 \leq b_5$$

$$x_y \cdot x_1 + n_y \cdot x_2 \leq b_6$$

$$x_z \cdot x_1 + n_z \cdot x_2 \leq b_7$$

$$k_3 \cdot x_2 \leq b_8$$

$$x_2 \geq b_9$$

$$x_2 \leq b_{10}$$

$$x_z \cdot x_1 + n_z \cdot x_2 \leq b_{11}$$

$$f_o = (x_1 + x_2)_{\max}$$

Для определения оптимальных режимов резания необходимо отыскать среди всех возмож-

ных неотрицательных значений x_1 и x_2 системы такие значения $x_{1\text{опт}}$ и $x_{2\text{опт}}$, при которых линейная функция будет принимать максимальное значение ($f_{\text{омакс}}$). Оптимальные значения варьируемых параметров определяем исходя из найденных величин $x_{1\text{опт}}$ и $x_{2\text{опт}}$, по следующим зависимостям:

$$t_{\text{опт}} = e^{x_{1\text{опт}}},$$

$$n_{\text{опт}} = e^{x_{2\text{опт}}}.$$

Полученную математическую модель можно представить также и в графическом виде (рис. 5). При этом, здесь каждое техническое ограничение представлено в виде прямой, которая определяет полуплоскость, где возможно существование решения данной системы. Полученный в результате пересечений граничных прямых прямоугольник будет являться геометрическим местом точек оптимальных значений варьируемых параметров. Эти прямые получаем путем представления ограничений в виде функции от одного из варьируемых параметров. В нашем случае ограничения представлялись в виде функций, которыми является значение $x_1 = \ln(t)$, от параметра $x_2 = \ln(n)$:

$$xP_{z1}(x_2) := \frac{b_1 - (n_z + 1) \cdot x_2}{x_z} \quad \text{— функция,}$$

выраженная из ограничения по допустимой составляющей силы резания P_z , определяющей тяговую силу, развиваемую приводом вращения бандажа на специальном стенде;

$$xP_{z2}(x_2) := \frac{b_2 - n_z \cdot x_2}{x_z} \quad \text{— функция, выра-}$$

женная из ограничения по допустимой составляющей силы резания P_z , определяющей возможные проскальзывания привода ролика специального стенда при его вращении;

$$xP_x(x_2) := \frac{b_3 - n_x \cdot x_2}{x_x} \quad \text{— по допустимой}$$

составляющей силы резания P_x , определяющей осевые смещения бандажа по поверхностям качения опорных роликов;

$xt_{\text{min}} := \ln(b_4)$ — по минимально допустимой величине глубины резания, обеспечивающей формирование поверхностей закрылков в пределах допуска при их бесцентровой обработке;

$xt_{\text{max}} := \ln(b_5)$ — по максимально допустимой величине глубины резания, обеспечиваю-

щей формирование поверхностей закрылков в пределах допуска при их бесцентровой обработке;

$$x\Delta_y(x_2) := \frac{b_6 - n_y \cdot x_2}{x_y} \quad \text{— по допустимой}$$

величине отжатий в технологической системе специального стенда;

$$xP(x_2) := \frac{b_7 - y_z \cdot x_2}{x_z} \quad \text{— по допустимой}$$

жесткости режущего инструмента;

$$xRa := \frac{b_8}{k_3} \quad \text{— по допустимой величине ше-}$$

роховатости поверхности;

$xn_{\text{min}} := \ln(b_9)$ — по минимальной величине частоты вращения бандажа при обработке на специальном стенде;

$xn_{\text{max}} := \ln(b_{10})$ — по максимальной величине частоты вращения бандажа при обработке на специальном стенде;

$$x\sigma_i(x_2) := \frac{b_{11} - y_z \cdot x_2}{x_z} \quad \text{— по допустимой}$$

прочности режущего инструмента.

Область определения прямых задаем в интервале значений переменной $x_2 := -3, -2, 6 \dots 1$.

На рис. 5 представлено графическое изображение математической модели процесса проточки канавки при реконструкции бандажа плавающего типа в вварной при следующих исходных данных: $t_{\text{max}} = 3$ мм; $t_{\text{min}} = 0,01$ мм; $\Delta_y = 3$ мм; $n_{\text{max}} = 2,14$ об/мин; $n_{\text{min}} = 0,1$ об/мин; $B_\delta = 40$ мм; $H_\delta = 60$ мм; $Ra = 10$ мкм.

В результате моделирования обработки в среде *MathCAD* получены следующие результаты:

$$x_{1\text{онм}} = \ln(t) = 1,0399 \rightarrow t_{\text{онм}} = 3 \text{ мм};$$

$$x_{2\text{онм}} = \ln(n) = 0,015 \rightarrow n_{\text{онм}} = 1,015 \text{ об/мин.}$$

Таким образом, получена математическая модель, позволяющая установить оптимальные значения таких технологических режимов, как: глубина резания и частота вращения бандажа для обработки специальных кольцевых фасонных проточек на торцевых поверхностях и формирования закрылков для условий реконструкции бандажей с использованием мобильного оборудования. На рис. 6 представлена обработка специальной кольцевой фасонной проточки на бандаже $\varnothing 6100$ мм при его реконструкции во вварной тип.

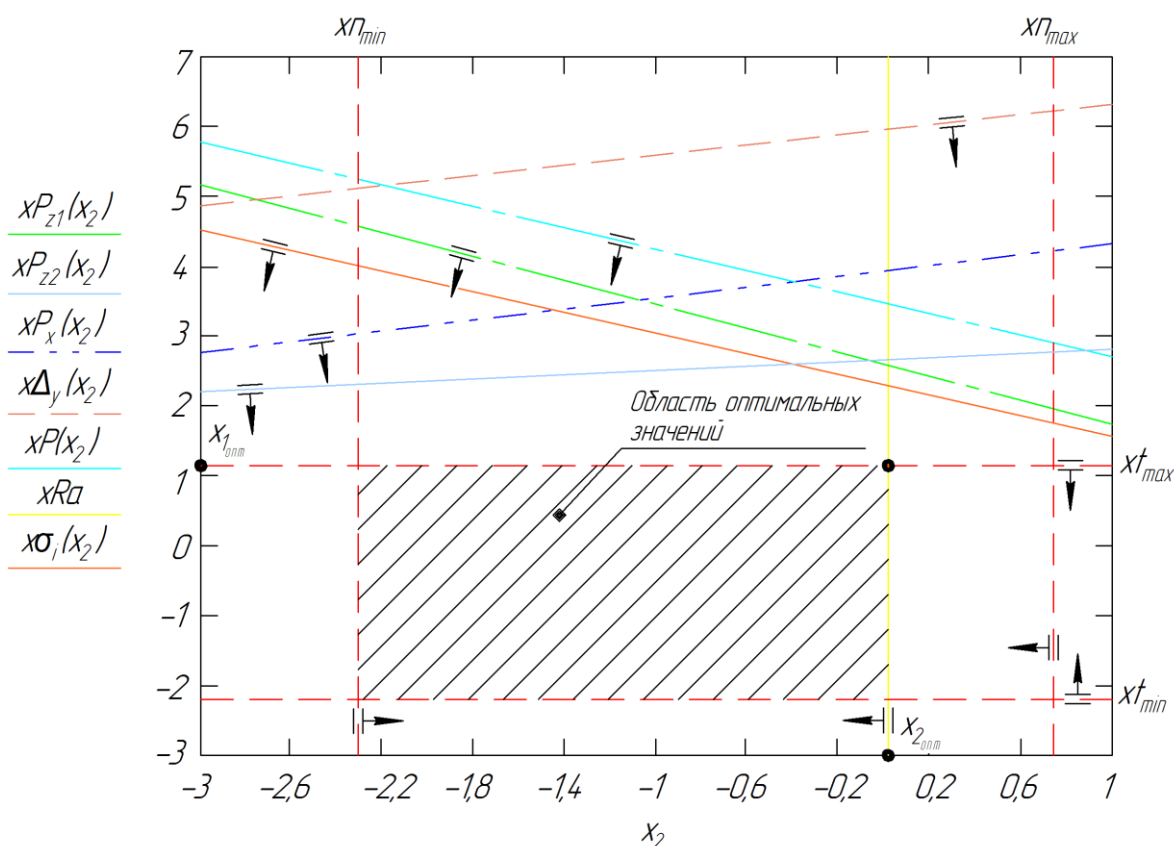


Рис. 5. Графическое представление математической модели процесса обработки кольцевой проточки и закрывка специальным мобильным оборудованием

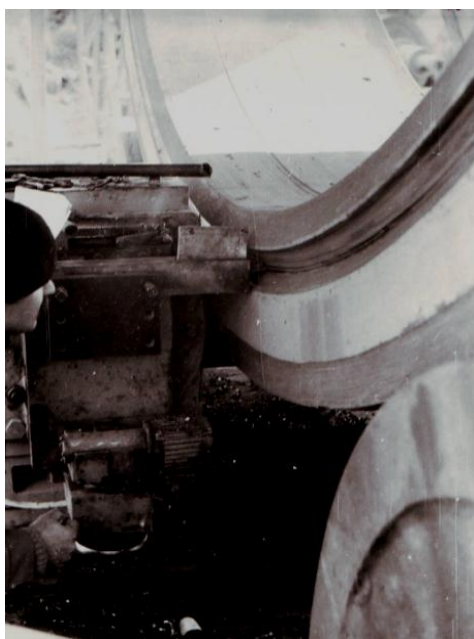


Рис. 6. Обработка специальной кольцевой фасонной проточки при реконструкции бандажа

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Пат. 114763 Российская Федерация, МПК⁷ F 27 В 7 / 20. Бандаж вращающейся печи / Черняев А.С., Шрубченко И.В., Мурыгина Л.В., Архипова Н.А., Рыбалко В.Ю.; заявитель и патентообладатель: Белгор. гос. технол. ун-т им.

В.Г. Шухова. – № 2011140909 / 02; заявл. 7.10.2011; опубл. 10.04.2012, Бюл. №10 – 3с.

2. Шрубченко И.В. Технологические основы обеспечения формы и условий контакта поверхностей качения опор технологических барабанов при обработке мобильным оборудованием: Дисс. докт. техн. наук. – МАИ, БГТУ им. В.Г.Шухова.– М.: 2007.– 373 с.

3. Справочник технолога-машиностроителя. В 2-х т. Т.2 / Под ред. А.Г. Косиловой и Р.К. Мещерякова. – 4-е изд., перераб. и доп. – М. : Машиностроение, 1985. 496 с.

4. . Определение оптимальных режимов бесцентровой обработки крупногабаритных изделий математическим моделированием / Л.В. Мурыгина, А.С. Черняев, В.Ю. Рыбалко, И.В. Шрубченко // Энергосберегающие технологические комплексы и оборудование для производства строительных материалов: межвуз. сборн. ст. / Белгор. гос. технол. ун-т. – Белгород: Изд-во БГТУ, 2011. – Вып. 10. – С.196-201.

5. Шрубченко И.В. Предмонтажная и окончательная обработка поверхностей опор качения при сборке крупногабаритных технологических барабанов // Сборка в машиностроении, приборостроении. – 2006. – №10 – С. 3-8.