

(эскизы, операции, объекты вспомогательной геометрии), составляющих резец, которые возможно изменить в любой момент [3].

Использование универсального математического пакета при выполнении инженерных задач позволяет существенно повысить эффективность трудоемких работ по определению параметров и оформлению документации алгоритмизированными процедурами. При осуществлении анализа полученных расчетных данных и использовании их в процессе проектирова-

ния резцов предоставляется возможность оперировать конструктивными данными, т.е. проводить многовариантные расчеты, с целью получения выверенных параметров. Также возможно проведение задачи оптимизации.

Весь процесс проектирования сводится к построению точных программно-выверенных пространственных твердотельных моделей, предоставляющих широкие возможности для анализа, синтеза и оптимизации вариантов конструкции.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Металлорежущие инструменты: учебник / Г.Н. Сахаров, О.Б. Арбузов, Ю.Л. Боровой и др. М.: Машиностроение, 1989. 328 с.
2. Информационно-вычислительные системы в машиностроении CALS-технологии / Ю.М. Соломенцев, В.Г. Митрофанов, В.В. Павлов, Л.В. Рыбаков. М.: Наука, 2003. 292 с.
3. AutoCAD: трехмерное моделирование и дизайн. СПб.: БХВ-Петербург, 2003. 288 с.

УДК 624.075.22+624.042.8

# Моделирование колебательных процессов в холоднокатаной полосе дрессировочного стана при чистовой прокатке

**В.И. ИЛЬКУН**, к.т.н., доцент,

Каргадинский государственный технический университет

**Ключевые слова:** дрессировочный стан, клеть, частота вынужденных колебаний, приводная линия.

Ранее в работе [1] была описана методика моделирования процесса свободных колебаний в фундаменте одноклетьевого дрессировочного стана 1700 (далее ОДС-1700) с одношпиндельным приводом. Сплошной общий железобетонный фундамент ОДС-1700 служит источником паразитных колебаний, передаваемых от одного технологического агрегата к другому (например, от разматывателя к клетки и т.д.). Следует также отметить, что из-за изменяющихся моментов инерции масс рулонов на барабанах разматывателя и моталки спектр генерируемых этими агрегатами вынужденных колебаний непрерывно изменяется в процессе дрессировки одного рулона полосы. Все вышеизложенное существенно усложняет процесс исследования вынужденных колебаний при работе ОДС-1700.

В настоящей работе предложена методика моделирования процесса вынужденных колебаний в холоднокатаной полосе при дрессировке на ОДС-1700.

Для исследования колебательных процессов и определения частот вынужденных колебаний полос их рассматривали раздельно (рисунок 1,а):

а) колебательные процессы на участке «разматыватель-клеть» (рисунок 1,б);

б) колебательные процессы на участке «клеть-моталка» (рисунок 1,в).

В обоих случаях колебания полосы описывались уравнениями, моделирующими колебания струны [1] (ось ординат ОУ на рисунке 1 совпадает с вертикальной осью симметрии рабочей клетки).

Уравнение малых колебаний полосы по аналогии с [1] (рисунок 1, 2).

$$\frac{\partial^2 y}{dz^2} = a^2 \frac{\partial^2 y}{dt^2}, \quad (1)$$

где  $a^2 = T_0/m_0$  (здесь  $T_0$  – натяжение полосы в общем случае, кг);

$m_0$  – масса единицы длины полосы,  $\frac{kg \cdot c^2}{m} \cdot \frac{1}{m}$  (в

технических единицах массы);

$y(z,t)$  – вертикальное смещение произвольной точки полосы на расстоянии  $z$  от начала координат (рисунок 1,б,в).

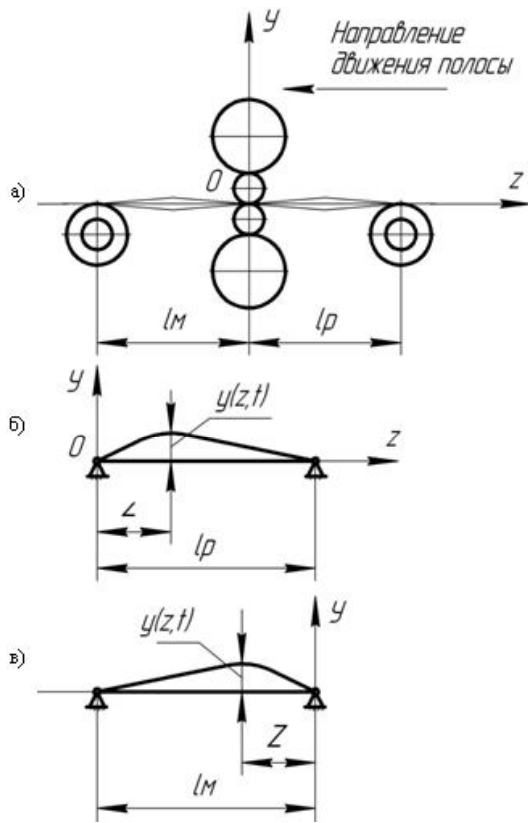
Скорость распределения продольных смещений (волн) в полосе

$$a = \sqrt{\frac{T_0}{m_0}}.$$

Решение уравнения (1) находим в виде [1]

$$y = Y(z,t)T(t).$$

Функция  $y(z,t)$  должна удовлетворять крайним условиям для разматывателя ( $z=0$ ;  $y=0$ ;  $z=l_p$ ;  $y=0$ ) и моталки ( $z=0$ ;  $y=0$ ;  $z=l_m$ ;  $y=0$ ) [1] (рисунок 1), так как концевые участки полосы на разматывателе, клетки и моталке приняты жестко закрепленными (т.е.  $y=0$ ) при  $z=0$ ,  $z=l_p$ ,  $z=l_m$ . Принимаем также, что длина полосы на участках «разматыватель-клеть» и «клеть-моталка» при изменении диаметра рулона в процессе дрессировки не меняется. Поэтому с учетом крайних условий выражение (1) примет вид [1]



а) – расчетная схема ОДС-1700; б) – схема колебательных процессов в полосе на участке «разматыватель–клеть»; в) – схема колебательных процессов в полосе на участке «клеть–моталка»  
Рисунок 1 – К расчету вынужденных колебаний полосы при дрессировке на ОДС-1700

$$\frac{\partial^2 y_1}{dz^2} + \frac{P^2}{a^2} y_1 = 0. \quad (2)$$

Решение уравнения (2) имеет вид [1]

$$y_1 = C_1 \cos \frac{P}{a} z + C_2 \frac{P}{a} z.$$

Следует, что  $C_1=0$ ;  $C_2 \sin P \frac{\lambda}{a} - l = 0$ ,

$$\sin \frac{P}{a} l_p = 0, \text{ отсюда } P \frac{l_p}{a} = \pi n (n=1, 2, \dots).$$

Далее определяем возможные значения частот вынужденных колебаний полосы  $P_{np}$  на участке «разматыватель–клеть» (рисунок 1, б)

$$P_{np} = \frac{\pi n_p}{l_p} a_p = \frac{\pi n_p}{l_p} \sqrt{\frac{T_p}{m_{0p}}},$$

здесь  $n_p$  – номер гармоники частоты вынужденных колебаний ( $n_p=1, 2, \dots$ );  
 $T_p$  – натяжение полосы, кг, на участке «разматыватель–клеть» (рисунок 1, б);  
 $m_{0p}$  – масса полосы от барабана разматывателя до очага деформации (в клетке).

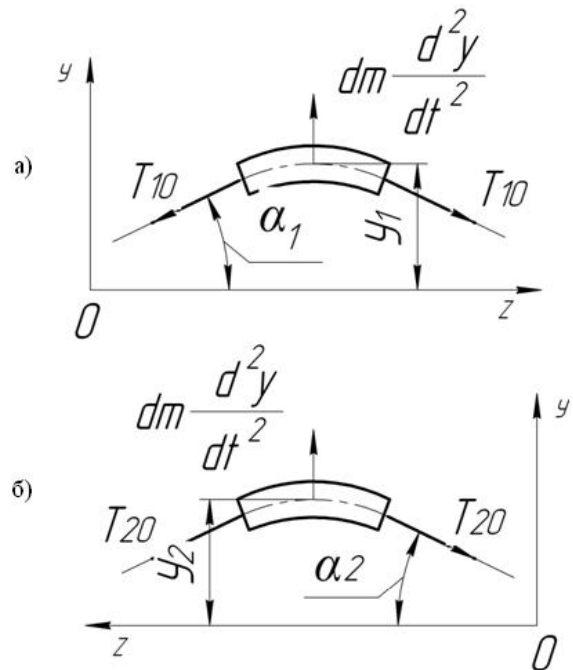
Аналогично для участка «клеть–моталка» (рисунок 1, в) получаем

$$P_{nm} = \frac{\pi n_m}{l_m} a_m = \frac{\pi n_m}{l_m} \sqrt{\frac{T_m}{m_{0m}}},$$

здесь  $n_m$  – номер гармоники частоты вынужденных колебаний ( $n_m=1, 2, \dots$ );  
 $T_m$  – натяжение полосы на участке «клеть–моталка», кг;  
 $m_{0m}$  – масса полосы от очага деформации (в клетке) до моталки.

При моделировании вынужденных колебаний полосы в процессе дрессировки на ОДС-1700 использовали аналогию с движущейся верхней лентой конвейера, что не противоречит уравнению (1). Для решения этой задачи применили переменные Эйлера [1]. Переходя от полных производных по времени к локальным, имеем

$$\left. \begin{aligned} \frac{dy}{dt} &= \frac{\partial y}{\partial t} + \frac{\partial y}{\partial z} \cdot \frac{\partial \alpha}{\partial t} = \frac{\partial y}{\partial t} + \frac{\partial y}{\partial z} \cdot v \\ \frac{d^2 y}{dt^2} &= \frac{\partial^2 y}{\partial t^2} + 2v \frac{\partial^2 y}{\partial z \cdot \partial t} + v^2 \frac{\partial^2 y}{\partial z^2} \end{aligned} \right\} \quad (3)$$



а) – «разматыватель–клеть»; б) – «клеть–моталка»

Рисунок 2 – К выводу уравнения колебаний тонкой упругой полосы (ленты) для участков

В результате преобразования системы (3) с учетом рисунка 2 получим уравнение вынужденных колебаний полосы (ленты) в общем виде

$$\frac{\partial^2 y}{\partial t^2} + 2v \frac{\partial^2 y}{\partial z \cdot \partial t} - \left( \frac{T_0}{m_0} - v \right) \frac{d^2 y}{dz^2} = 0. \quad (4)$$

Решение уравнения (4) представим в виде

$$y = y_1(z) e^{i p t}. \quad (5)$$

После подстановки (5) в (4) получим уравнение колебаний полосы относительно функции  $y_1(z)$

$$\frac{\partial^2 y}{\partial z^2} - \frac{2v p i}{\left( \frac{T_0}{m_0} - v^2 \right)} \cdot \frac{\partial y_1}{\partial z^2} + \frac{p^2}{\left( \frac{T_0}{m_0} - v^2 \right)} y_1 = 0. \quad (6)$$

Функция  $y_1$  должна удовлетворять крайним условиям  $z_1=0$ ;  $y_1=0$ ;  $z_1=l_p$ ;  $y_1=0$  (для участка «разматыва-

тель-клеть», рисунок 2, а)  $z_2=0$ ;  $y_2=0$ ;  $z_2=l_m$ ;  $y_2=0$  (для участка «клеть-моталка», рисунок 2 б).

Характеристическое уравнение для выражения (6), принимая  $y_1=Ay^{\lambda z}$ , имеет вид

$$\lambda^2 - a_1 i \lambda + a_2 = 0, \quad (7)$$

где  $a_1 = \frac{2vp}{\left(\frac{T_{l_0}}{m_0} - v^2\right)}$ ;  $a_2 = \frac{p^2}{\left(\frac{T_{l_0}}{m_0} - v^2\right)}$ .

Корни уравнения (7)

$$\lambda_{1,2} = \frac{i\left(a_1 \pm \sqrt{a_1^2 + 4a_2}\right)}{2}.$$

Решение уравнения (6) можно представить в виде

$$y_1 = C_1 e^{\lambda_1 z} + C_2 e^{\lambda_2 z}. \quad (8)$$

Решение (8) должно удовлетворять однородным краевым условиям, что позволяет получить следующее ограничение [1]:

$$e^{\frac{1}{\lambda_1} l} - e^{\frac{1}{\lambda_2} l} = 0$$

или

$$e^{(\lambda_2 - \lambda_1)l} = 1. \quad (9)$$

Условие (9) выполняется при

$$(\lambda_2 - \lambda_1)l = 2\pi n i$$

или  $\sqrt{a_1^2 + 4a_2}l = 2\pi n$ ,

откуда после преобразований получаем значения частот вынужденных колебаний полосы в общем виде

$$p_n = \frac{\pi n}{l} \sqrt{\frac{T_{l_0}}{m_0} \left(1 - \frac{m_0 v^2}{T_{l_0}}\right)}, \quad (10)$$

где  $n=1, 2, 3 \dots$ ;

$v$  – линейная скорость движения полосы, м/с;

$T_{l_0}$  может принимать значение  $T_p$  (на разматывателе) или  $T_m$  (на моталке).

Частоты вынужденных колебаний влияют на натяжение полосы при изменении диаметров смотанной и намотанной частей рулона. Это приводит к изменению величины заднего и переднего натяжений, и, следовательно, частот вынужденных колебаний полосы при размотке и смотке, что может способствовать возникновению резонансных явлений в полосе с одной стороны или по обе стороны клетки.

Результаты расчетов частот вынужденных колебаний полосы на участках «разматыватель-клеть» и «клеть-моталка» (рисунок 1), зависимостей  $p_p = f_1(\sigma \cdot s)$   $p_m = f_2(\sigma \cdot s)$  показаны на рисунке 3.

При расчетах шаг изменения ширины полосы  $\sigma$  составил  $\Delta\sigma=100$  мм в диапазоне 1500-700 мм, шаг изменения толщины полосы  $\Delta S=0,4$  мм в диапазоне 2,0-0,4 мм. Кривые 1 и 6 построены для полос  $\sigma=1500$  мм; кривые 2 и 7 для полос  $\sigma=1300$  мм, кривые 3 и 8 для полос  $\sigma=1100$  мм, кривые 4 и 9 для полос  $\sigma=900$ , кривые 5 и 10 для полос  $\sigma=700$  мм.

Анализ полученных результатов расчета  $p_p = f_1(\sigma \cdot s)$  и  $p_m = f_2(\sigma \cdot s)$  позволил установить, что:

а) для полос 1500x1,6 мм основная частота вынужденных колебаний и 2-5-я гармоники совпадают по величинам с аналогичными частотами вынужденных колебаний для полос 1200x2 мм;

б) для полос 1500x1,2 мм основная частота вынужденных колебаний и 2-я, 5-я гармоники совпадают по величинам с аналогичными частотами для полос 900x2 мм;

в) для полос 1000x1,6 мм основная частота вынужденных колебаний и 2-я, 5-я гармоники совпадают по величине с аналогичными частотами для полос 800x2 мм.

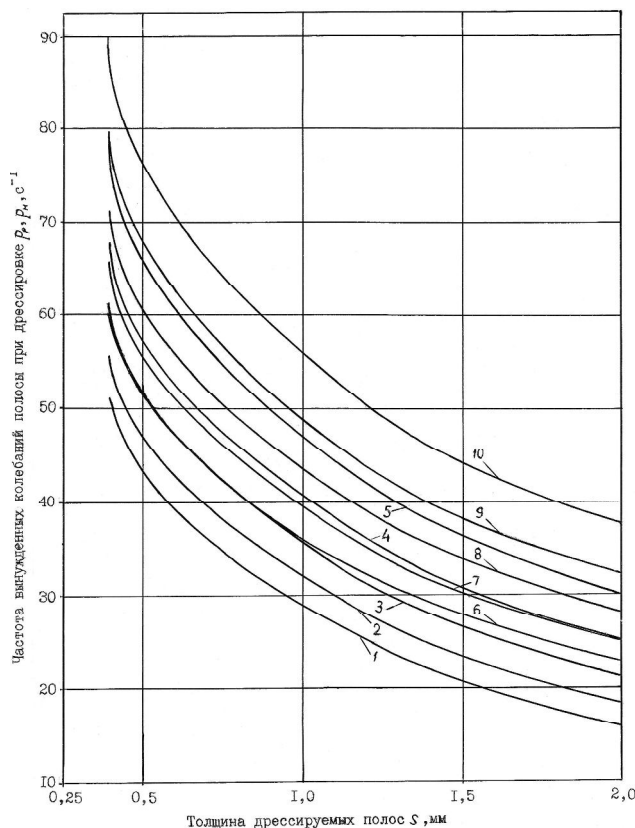


Рисунок 3 – Изменение основных частот вынужденных колебаний полосы при дрессировке  $p_m = f_m(\sigma \cdot s)$ ,  $p_p = f_p(\sigma \cdot s)$  на ОДС-1700 участков «клеть-моталка» (кривые 1-5) и «разматыватель-клеть» (кривые 6-10)

Установлено также, что полученная для полосы 1500x2 мм на участке «разматыватель-клеть» частота вынужденных колебаний  $P=15,941 \text{ с}^{-1}$ . Это близко к верхнему значению частоты вынужденных колебаний передаваемого крутящего момента в передаче через муфту МЗП привода ОДС-1700 с одним нижним приводным рабочим валком, составляющей  $13 \text{ с}^{-1}$  [2], а также частоте вращения внутренних колец подшипников качения рабочего вала ОДС-1700 ( $f_b=13,26 \text{ с}^{-1}$ ) [3] и первой гармоники вынужденных колебаний фундаментной плиты ОДС-1700 ( $\omega'_{\text{фн}}=14,872 \text{ с}^{-1}$ ) [4].

Полученные результаты свидетельствуют о взаимосвязи колебательных процессов, происходящих в тракте прокатки-дрессировки, главном приводе и фундаменте ОДС-1700. Это позволяет использовать полученную методику при разработке систем виброзащиты агрегатов ОДС-1700 и для исследования колебательных процессов в двухклетевых дрессировочных станках.

Наши рекомендации по снижению виброактивности агрегата ОДС-1700 приведены в [4].

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Светлицкий В.А., Нарайкин О.С. Упругие элементы машин. М.: Машиностроение, 1989. 264 с.
2. Илькун В.И., Кузнецов Ю.М., Кузьминов А.А. // Сталь. 1985. № 1. С. 51-52.
3. Илькун В.И., Куликов В.И., Карабалин А.А. // Там же. 1996. № 11. С. 42-46.
4. Илькун В.И. Моделирование свободных колебаний фундаментной плиты и упругого основания фундамента ОДС-1700. Технология производства металлов и вторичных материалов // Республиканский научный журнал / Гл. ред. А.Б. Найзабеков. Караганда: Изд-во КарГИУ, 2007. № 1. С. 147-152.

УДК 621:65(574)

## Анализ видов, последствий и причин потенциальных дефектов

У.М. САМЕКИНА, студентка гр. СТ-07-2,

О.М. ЖАРКЕВИЧ, к.т.н., доцент,

О.А. НУРЖАНОВА, преподаватель,

Карагандинский государственный технический университет

**Ключевые слова:** FMEA-анализ, потенциальные дефекты, система менеджмента качества, жизненный цикл продукции, элеватор, экспертная оценка.

Одной из основных задач системы менеджмента качества является обеспечение выявления потенциальных несоответствий (дефектов) и предотвращение их появления на всех стадиях жизненного цикла продукции. Важнейшим методом решения этой задачи является анализ видов и последствий потенциальных дефектов (FMEA)<sup>1</sup>. В настоящее время не менее 80 % разработок технических изделий и технологий проводится с применением анализа видов и последствий потенциальных дефектов (FMEA-методологии).

Анализ видов и последствий потенциальных несоответствий широко применяется многими мировыми компаниями как для разработки новых конструкций и технологий, так и для анализа и планирования качества производственных процессов и продукции. Метод анализа видов и последствий потенциальных дефектов (FMEA) представляет собой систематизированный комплекс действий, проводимых для того, чтобы:

- выявить несоответствия продукции и процессов, а также последствия возникновения этих несоответствий и дать им количественную оценку;
- создать ранжированный список видов и причин несоответствий для планирования корректирующих и предупреждающих действий;
- определить корректирующие и предупреждающие действия, которые могли бы устранить или снизить вероятность возникновения несоответствий;
- документировать данные по результатам анализа для накопления в базе знаний.

Применение этого метода основано на следующих принципах:

а) командная работа. FMEA проводится силами специально подобранной многофункциональной команды экспертов. Эффективность анализа напрямую

зависит от профессионального уровня, практического опыта и согласованности действий специалистов;

б) иерархичность. Для сложных изделий, процессов и процессов изготовления сложных технических объектов анализу подвергается как изделие/процесс в целом, так и его составляющие (детали/операции);

в) итеративность. Анализ проводится неоднократно; он возобновляется при выявлении новых факторов и при любых изменениях, влекущих за собой изменение последствий и их рисков;

г) регистрация данных. Анализ видов и последствий потенциальных несоответствий и его результаты должны быть документально оформлены.

На рисунке 1 представлена схема работы FMEA-команды ТОО КМЗ им. А. Пархоменко. Объектом изучения является элеватор ковшовый ленточный Л160 (далее элеватор Л160).

**1 этап.** Образование FMEA-команды

Базовый состав команды специалистов состоит из шести человек:

- руководитель рабочей группы;
- инженер-технолог, ответственный за разработку технологического процесса;
- инженер-технолог, ответственный за разработку аналогичного технологического процесса;
- инженер-конструктор;
- представитель отдела работы с потребителем;
- представитель производства/службы контроля.

В своей работе FMEA-команда применяет метод мозгового штурма; рекомендуемое время работы – от 3 до 6 часов в день.

Полный состав участников FMEA-команды для работы с данным техническим объектом неизменный, однако в отдельные дни в работе FMEA-команды может принимать участие неполный ее состав, что определяется целесообразностью присутствия тех или иных специалистов при рассмотрении текущего вопроса.

<sup>1</sup> FMEA (Potential Failure Mode and Effects Analysis) – анализ видов и последствий потенциальных отказов – это метод, изложенный в руководстве с аналогичным названием к стандарту QS-9000 «Требования к системам качества»