

МАШИНОСТРОЕНИЕ И МАШИНОВЕДЕНИЕ

DOI: 10.34031/2071-7318-2025-11-1-96-108

***Шрубченко И.В., Хуртасенко А.В., Бондаренко Ю.А., Воронкова М.Н.**

Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова

*E-mail: ivshrub@yandex.ru

К ОПРЕДЕЛЕНИЮ РЕЖИМОВ ДЛЯ МОБИЛЬНОЙ ТЕХНОЛОГИИ ОБРАБОТКИ КРУПНОГАБАРИТНЫХ ПОВЕРХНОСТЕЙ КАЧЕНИЯ

Аннотация. В статье рассмотрены особенности определения рациональных режимов обработки поверхностей качения опор вращающихся печей с использованием мобильных технологий. Предложена оценка наработки опор вращающихся печей для определения периодичности восстановительной обработки поверхностей качения и показана целесообразность такого подхода с для прогнозирования и определения сроков необходимой восстановительной обработки рабочих поверхностей опорных деталей для обеспечения надежной работоспособности агрегатов. Приведено обоснование применения разработанной конструкции мобильного станочного модуля и технологических наладок, обеспечивающих восстановление требуемой точности формы крупногабаритных деталей вращения в зависимости от их типоразмеров. Предложен ряд зависимостей для определения рациональных режимов обработки. Эти зависимости учитывают все технологические режимы обработки, которые оказывают наибольшее влияние на параметры обрабатываемых поверхностей. Для исследования деформаций в технологической системе предложено применить конечно-элементный анализ. Приведена последовательность моделирования и оценки напряженно-деформированного состояния встраиваемого станка для существующих схем базирования станка на опорных элементах вращающихся печей и ориентации исполнительного устройства при обработке поверхностей опорных деталей – бандажей и роликов. В результате исследований и учета всех необходимых геометрических и технологических параметров, свойственных рассмотренным схемам обработки выведена математическая модель, позволяющая на основе метода линейного программирования определять и оптимизировать технологические режимы обработки.

Ключевые слова: технология, мобильный, станочный модуль, станок, восстановление формы, поверхности опор качения, печной агрегат, наработка на отказ.

Введение. В последнее время для восстановления формы поверхностей качения особенно в крупногабаритных технологических машинах, используемых в различных областях добывающей и перерабатывающей промышленности [1, 2, 3], применяют так называемые мобильные технологии [4, 5, 6]. Данные технологии обеспечивают требуемую геометрическую точность взаимного расположения поверхностей деталей агрегатов для их безотказной работоспособности [7, 8, 9, 10]. Такие технологии предполагают использование специальных переносных станков [11, 12, 13], которые могут быть установлены на работающий агрегат и, используя его соответствующие движения, обеспечивают выполнение механической восстановительной обработки поверхностей качения опорных деталей вращения из которых состоят опоры вращающихся печей. Для применения мобильных встраиваемых станков требуется дополнительные установочные базы, которые могут обеспечить правильное перемещение исполнительных органов станка при обработке. Это часто является одной из приоритетных задач при реализации мобильных технологий восстановительной обработки и требует применения дополнительных конструктивных

решений. Ряд исследований, которые были проведены отраслевой лабораторией совершенствования и повышения эксплуатационной надежности оборудования цементных производств показали, что для таких агрегатов как вращающиеся цементные печи, остро возникает необходимость в восстановлении формы поверхностей качения опор. В частности, по двум предприятиям ЗАО «Белгородский цемент» и ЗАО «Вольскцемент», были проанализированы данные по наработке опорных поверхностей вращающихся печей на отказ, по причинам, связанным с выходом из строя опорных поверхностей. В таблице 1 представлены данные по наработке вращающихся печей на отказ [14].

Методика исследования. На основании этих данных, были построены диаграммы, отображающие динамику останова агрегата по причине потери работоспособности опорных деталей (рис. 1). Анализ графических диаграмм позволяет судить о том, что распределение величины отказов вернее всего подчиняется экспоненциальному закону. Это дает основания для определения необходимых сроков для начала выполнения восстановительной обработки поверх-

ностей качения в соответствии с принятым законом распределения отказов.

В соответствие с данным законом распределения точечную оценку параметра наработки на отказ можно вычислить по следующей известной зависимости [15]:

$$\lambda = \frac{d}{\sum_{i=1}^d t_i + (N-d) \cdot T} \quad (1)$$

где d – число объектов вышедших из строя, шт.; t_i – время наработки исследуемых деталей на отказ, сут.; N – число деталей, шт., наблюдаемых при исследовании; T – длительность наблюдения за исследуемыми объектами, сут.

Таблица 1

Наработка вращающихся цементных печей на отказ по причинам поверхностей качения опор

Период мониторинга, сут.	Данные по мониторингу наработка на отказ (сутки наступления отказа)			
	Сутки, на которые наступил отказ для роликов	Количество отказов	Сутки, на которые наступил отказ для бандажей	Количество отказов
0...200	49,69,72,84,90,92,92,115,123,137,157,159,163,171,175,188,193,197	18	-	0
201...400	218,222,247,262,270,277,280,285,303,310,314,320,322,329,333,338,347,360,389	19	360, 391	2
401...600	405,413,421,425,451,468,488,507,508,513,515,517,525,541,553,577,594,597,598,599	20	442,530,530,530	4
601...800	646,648,663,664,671,672,696,698,715,720,722,725,727,759,775,795	16	600,622,622,622,622,622,730,730	6
801...1000	814,826,827,828,832,839,841,867,891,897,900,910,922,930,947,960,962,989,994	19	860,862,920,985,985	5
1001...1200	1027,1033,1067,1068,1073,1083,1091,1116,1137,1163,1171,1196	12	1184,1184,1184,1220	4
1201...1400	1238,1240,1254,1259,1264,1304,1320,1321,1361,1372,1387	11	1220,1340,1341	3
1401...1600	1409,1416,1418,1425,1426,1434,1469,1494	8	-	0
1601...1800	1624,1664,1714,1720,1723,1739,1742	7	-	0
1801...2000	1823,1825,1826,1976	4	1955,1972	2
2001...2200	2025,2057,2065,2116,2118,2165,2186,2190	8	2137,2145,2165	3
2201...2400	2255,2830,2364,2385	4	-	0
2401...2600	2427,2511,2555	3	2555	1
2601...2800	2660	1	2620,2665,2665	3
2801...3000	2920	1	2850	1
3001...3200	3090	1	3052, 3086	2
32001...3400	3285,3285,3285,3285,3285,3285,3285,3285,3285,3285,3285,3289	12	-	0
3401...3600	-	0	3450,3498	2
3601...3800	3650,3650,3650,3650,3650,3650,3650,3650,3650,3650,3650	9	3650,3650,3650,3650,3650,3650,3650,3650,3650	8

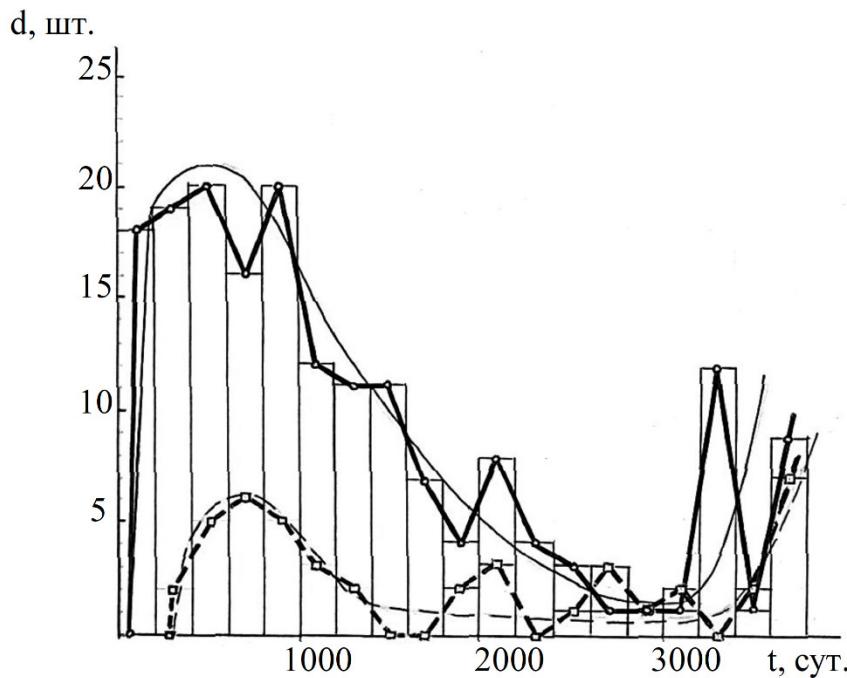


Рис.1. Диаграмма распределения отказов вращающихся цементных печей по результатам диагностики двух предприятий цементной отрасли.

Верхние и нижние доверительные границы определим по формулам:

$$\lambda_h = \frac{\lambda \cdot N \cdot \chi_{p,h}^2}{d(2N-d+\frac{1}{2}\chi_{p,h}^2)}, \quad (2)$$

$$\lambda_b = \lambda + \lambda_h, \quad (3)$$

где $\chi_{p,h}^2$ – квантиль χ^2 – распределения. Приняв доверительную вероятность двухсторонних границ $\beta = 0,9$, время безотказной работы поверхностей качения бандажей и опорных роликов, определим как:

$$t = -\frac{\ln(P(t))}{\lambda} \quad (4)$$

Результаты расчетов показали, что поверхности качения бандажей нуждаются в восстановительной механической обработке, уже через 10,5 месяцев эксплуатации печи, а опорные ролики, значительно раньше – через 2 месяца. Как видим, восстановительная механическая обработка поверхностей качения, весьма актуальна применительно к вращающимся цементным печам. Применение мобильной технологии, позволяет успешно решить задачу поддержания формы поверхностей качения опор, в пределах установленных допусков. Отметим, что в настоящее время для реализации такой технологии применяют различные по конструкции специальные переносные станки [16, 17]. С целью обеспечения эффективной восстановительной обработки указанных деталей мобильными станоч-

ными модулями необходимо определение рациональных технологических режимов, что возможно на основе применения математических моделей, учитывающих особенности применяемых схем обработки и конструкций оборудования.

Основная часть. Анализ указанных конструкций станков показывает, что наиболее совершенным является конструкция, разработанная в Белгородском государственном технологическом университете им. В.Г. Шухова [18]. Основной отличительной особенностью этого станка является его универсальность, предполагающая выполнение механической обработки поверхностей качения как бандажей, так и опорных роликов, без переустановки самого станка. Отличительной особенностью станка является и то, что он встраивается непосредственно в конструкцию опоры вращающейся печи, что позволяет существенно снизить погрешность установки. Конструкция станка (рис. 2) содержит две опорные стойки, в отверстиях которых размещена направляющая. Причем, одна стойка имеет возможность фиксированного перемещения вдоль направляющей, что дает определенную универсальность при использовании станка для обработки определенного диапазона типоразмеров опор агрегатов. Другая стойка связана с приводом подач для обеспечения автоматизированного перемещения продольного суппорта, который в свою очередь имеет две базовые плоскости для установки поперечного суппорта в два различные положения.

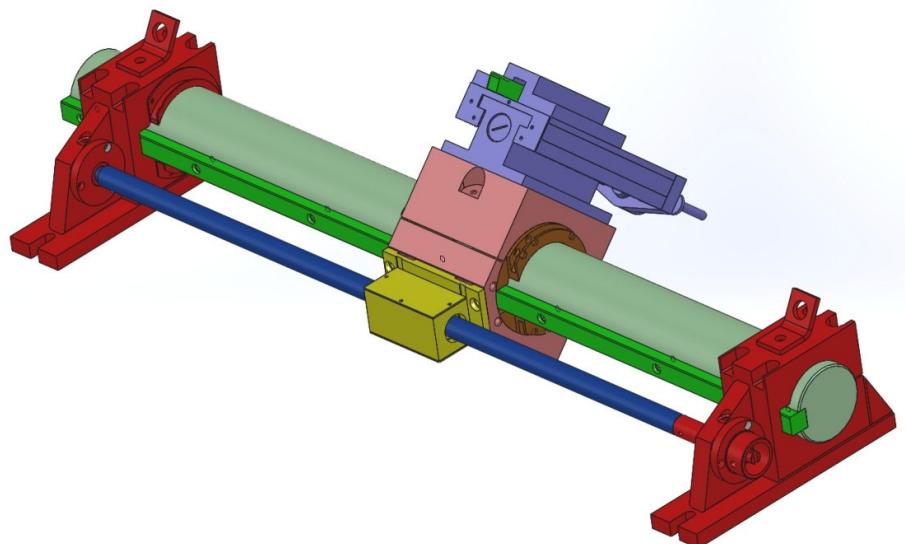


Рис. 2. Универсальный встраиваемый станок УВС-01

Чтобы установить станок на опору печи, на корпусы подшипниковых узлов опор самого агрегата вначале, до установки станка, устанавливаются специальные технологические наладки – опоры переходные, которые являются сменными (рис. 3).

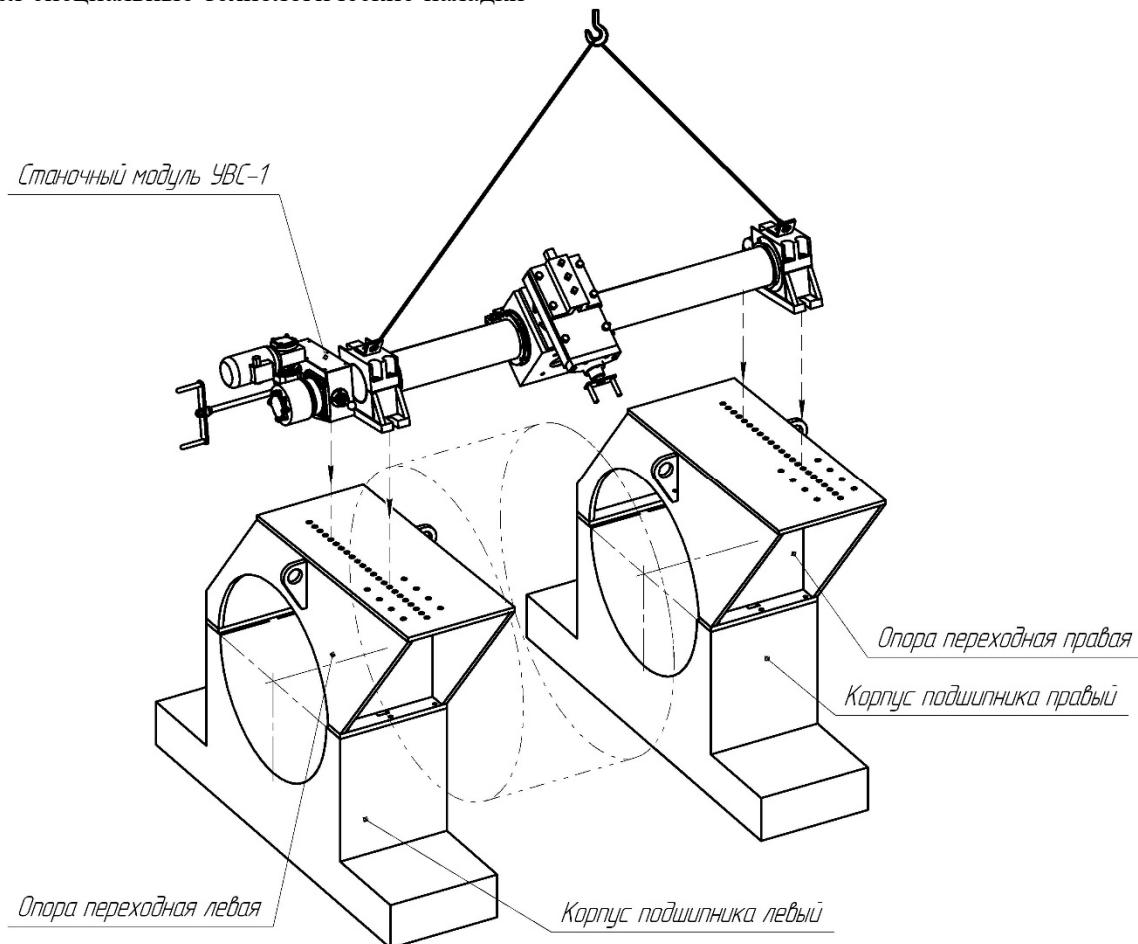


Рис. 3. Монтаж станка на переходные опоры, установленные на корпусах подшипниковых узлов

Сам станочный модуль устанавливают непосредственно, на установочные плоские поверхности переходных опор - сменных технологических наладок. Вначале настраивают станок для обработки поверхности опорного ролика. Для этого устанавливают поперечный суппорт на

нижнюю плоскость продольного суппорта, которая ориентирована по нормали к цилиндрической поверхности ролика (рис. 4).

После проведения обработки опорного ролика, станок перенастраивается для выполнения

обработки поверхности бандажа. Для этого суппорт переустанавливается на верхнюю опорную

плоскость продольного суппорта, которая ориентирована по нормали к наружной цилиндрической поверхности бандажа (рис. 5).

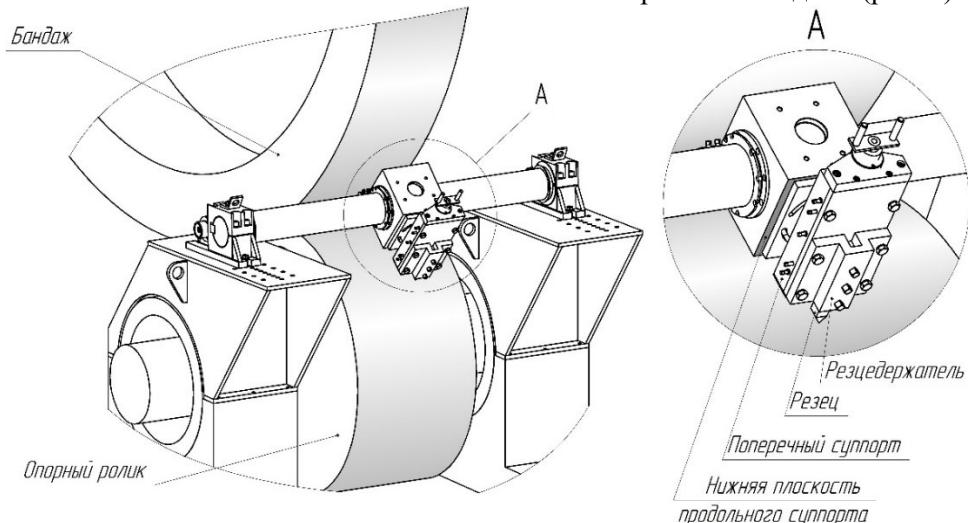


Рис. 4. Вариант настройки станка для обработки поверхности опорного ролика

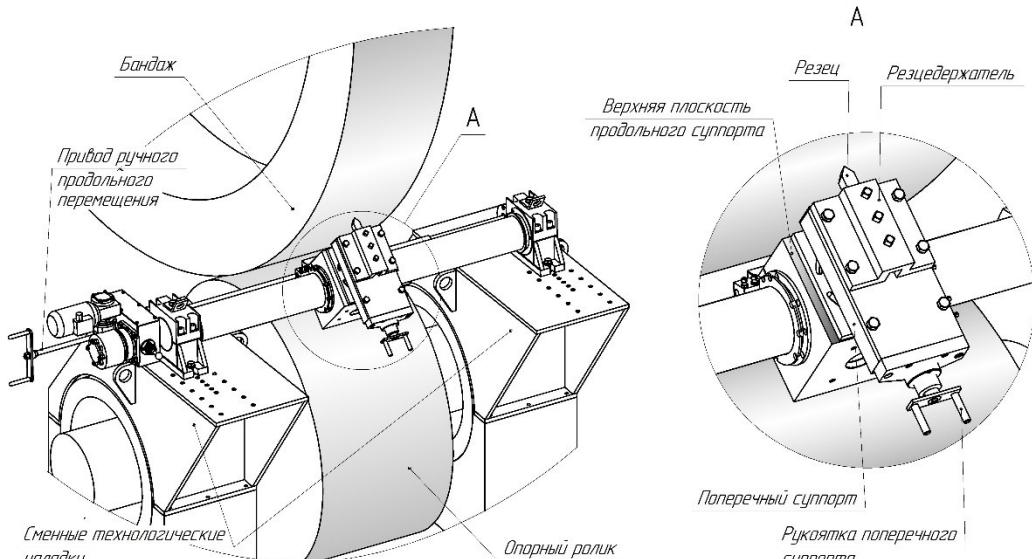


Рис. 5. Вариант настройки станка для обработки поверхности бандажа

Так как опора печи содержит два опорных ролика, то получаются две возможные схемы наладки (рис. 6). Следует отметить, что обработка поверхности качения бандажа возможна для любой из приведенных схем. С учетом этого, точка приложения силы резания и направление ее действия могут изменяться (рис. 7). Значит и отжатия возникающие в технологической системе станка, могут существенно отличаться.

Кроме отжатий, возникающих в технологической системе, еще ряд факторов будет оказывать влияние на формирование точности обработки поверхностей качения. Так как поверхности качения имеют значительные по величине размеры, то время, необходимое для выполнения даже одного рабочего хода, оказывается весьма значительным. Это значит, что и размерный износ инструмента, также может получиться значи-

тельный. Поэтому для определения рациональных геометрических и технологических параметров обработки, следует искать с учетом требуемого периода стойкости инструмента. Известно, что рекомендуемый период стойкости резца для продольного точения в диапазоне скорости 150 м/мин составляет 60 мин. Так как для условий обработки поверхностей качения опор вращающихся печей, оказывается существенно ниже и составляет примерно 20 м/мин, то для прохождения резцом аналогичного пути резания в 9000 м, потребуется 450 мин. Значит и стойкость инструмента должна составить не менее 450 мин. Чтобы получить уравнение, описывающее зависимость режимов обработки, для обеспечения указанной стойкости, используем следующую зависимость для скорости резания (V), м/мин [19]:

$$V = \frac{c_v}{T^{m_t} x_{v_s} y_{v_y}} \cdot k_v , \quad (5)$$

где $C_v = 340$, $k_v = 0,83$, $x_v = 0,15$, $y_v = 0,45$, $m = 0,2$ – справочные данные, которые можно выбрать для условий наружного продольного течения стали твердосплавным инструментом [19]. После выполнения преобразований, получена зависимость, позволяющая определять режимы, которые обеспечивают необходимую стойкость инструмента:

$$t^{x_v} \cdot s^{y_v} \leq \frac{C_v \cdot k_v}{T^{m,V}}, \quad (6)$$

После логарифмирования полученное выражение без степенных зависимостей имеет вид:

$$x_v \cdot \ln t + y_v \cdot \ln s \leq \ln\left(\frac{C_v \cdot k_v}{T^{m,V}}\right) \quad (7)$$

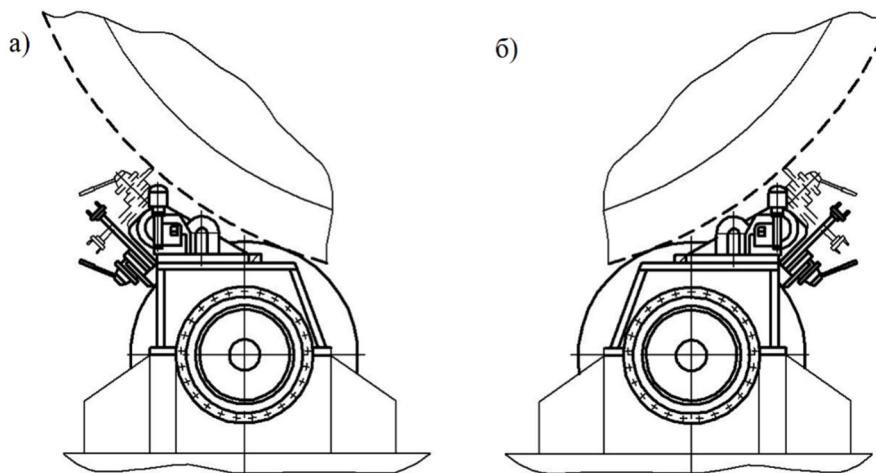


Рис. 6. Возможные схемы наладки для обработки поверхностей качения опор вращающейся печи

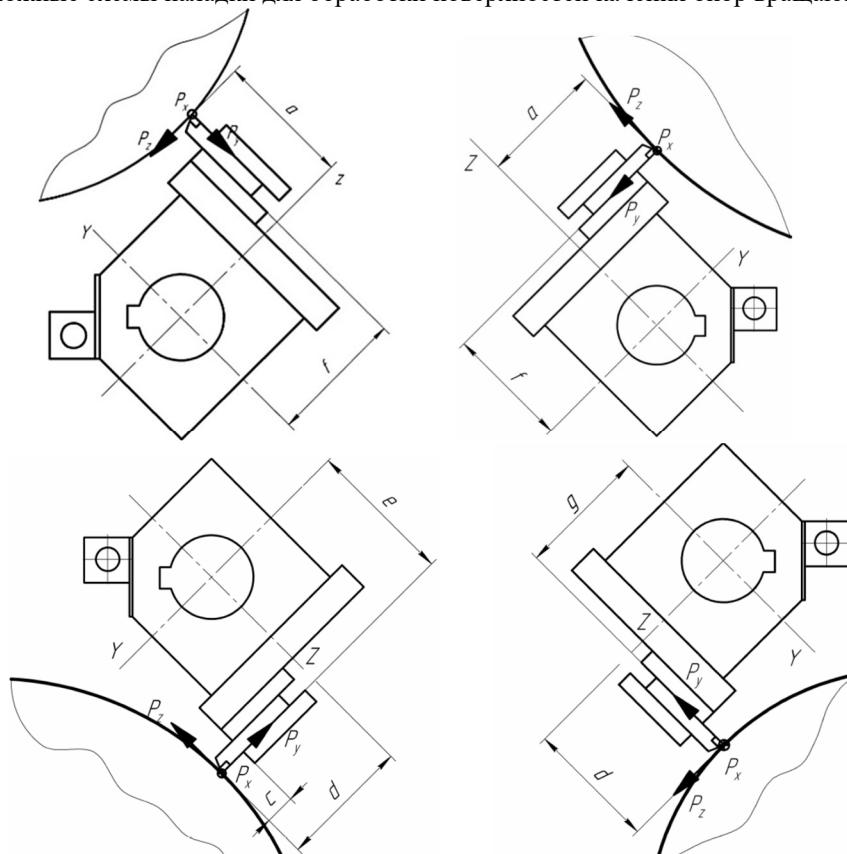


Рис. 7. Возможные схемы приложения силы резания и направления их действия

После введения обозначений: $\ln(t) = x_1$, $\ln(s) = x_2$, $\ln\frac{C_v \cdot k_v}{T^{m,V}} = b_1$ и получается линейная зависимость:

$$x_v \cdot x_1 + y_v \cdot x_2 \leq b_1 \quad (8)$$

Определяя рациональные режимы обработки, необходимо учитывать тяговую силу, развивающуюся приводом подач. Очевидно, что она должна быть достаточной, чтобы преодолеть осевую составляющую силы резания. Ее значение можно определить по формуле [19]:

$$P_x = 10 \cdot C_x \cdot t^{x_x} \cdot s^{y_x} \cdot V^{n_x} \cdot k_p, \quad (9)$$

где $C_x = 339$, $k_p = 0,74$, $x_x = 1$, $y_x = 0,5$, $n_x = -0,4$ – справочные данные, соответствующие условиям резания [19].

После преобразований и логарифмирования зависимость (9) будет иметь вид:

$$x_x \cdot \ln t + y_x \cdot \ln s \leq \ln \left(\frac{P_x}{10 \cdot C_x \cdot V^{n_x \cdot k_p}} \right) \quad (10)$$

После введения соответствующих обозначений, получено еще одно линейное уравнение:

$$x_x \cdot x_1 + y_x \cdot x_2 \leq b_2 \quad (11)$$

Отличительной особенностью обработки поверхности качения бандажа, является бесцентровая схема. Как известно [20, 21], для такой схемы, глубина резания оказывает существенное влияние на процесс формообразования. Моделируя процесс обработки, можно определить предельные значения глубины резания, при которых будет происходить процесс исправления формы. Таким образом, получены еще две линейные зависимости, которые позволяют установить рациональные режимы обработки:

$$x_1 \leq b_3; \quad x_1 \geq b_4, \quad (12)$$

где $x_1 = \ln(t)$, $b_3 = \ln(t_{max})$, $b_4 = \ln(t_{min})$.

Известно, что в процессе резания в технологической системе возникают отжатия, что существенно влияет на возникновение погрешности формы обрабатываемых поверхностей. Анализ технологической системы показывает, что наибольшее влияние на возникновение отжатий, оказывает сам переносной станок. Для того, чтобы выявить влияние параметров обработки на отжатия в технологической системе, а также их величины целесообразно выполнить исследование напряженно-деформированного состояния технологической системы.

Такие исследования возможно выполнить на основе цифровой 3D модели станочного модуля. Такая модель была разработана в CAD системе. На основе CAD модели выполнено конечно-элементное моделирование и симуляция состояния технологической системы под действием рабочих нагрузок. Для имитационного моделирования поведения технологической системы вводится ряд ограничений имитирующих взаимодействие элементов в технологической системе. Для рассматриваемых схем обработки это опорные поверхности двух стоек станка и соответствующие поверхности технологических наладок. В модели, учитывая допущение абсолютной жесткости элементов технологи-

ческих наладок, это взаимодействие реализуется ограничением типа жесткое закрепление по опорным поверхностям двух стоек (рис. 8). К режущей кромке резца прикладывается сила резания, в соответствие с рассмотренными ранее схемами наладок. Для удобства, сила резания раскладывается на отдельные составляющие P_x , P_y и P_z , Н. На рисунке 9 представлена конечно-элементная модель станочного модуля, сгенерированная в CAE системе.

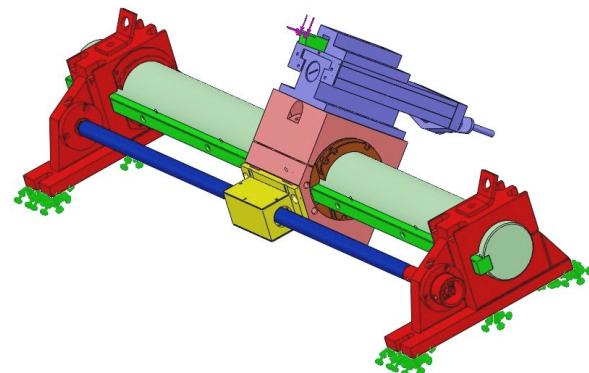


Рис. 8. Расчетная схема технологической системы

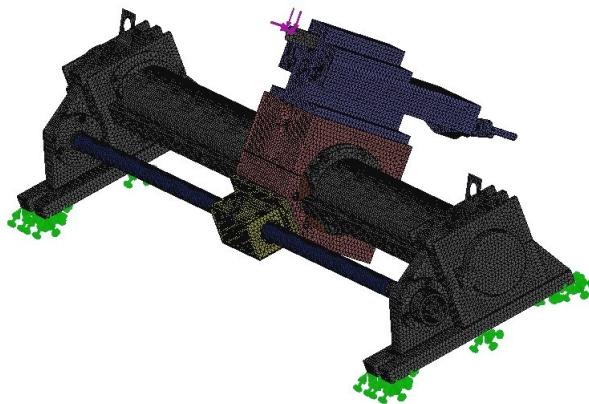


Рис. 9. Конечно-элементная модель технологической системы

Для сокращения временных затрат на моделирование связанных с расчетами целесообразно упростить расчетную модель исключив некоторые элементы, не влияющие на целевые значения расчетов и заменить их соответствующими ограничениями в модели. Так в рассматриваемой модели исключены такие компоненты как стойки, а их влияние заменено на соответствующие ограничения (рис. 10). Причем для левой стойки установлены ограничения перемещения как в осевом, так и радиальном направлении. Для правой стойки – ограничение перемещения только в радиальном направлении, так как в осевом направлении, возможны осевые перемещения.

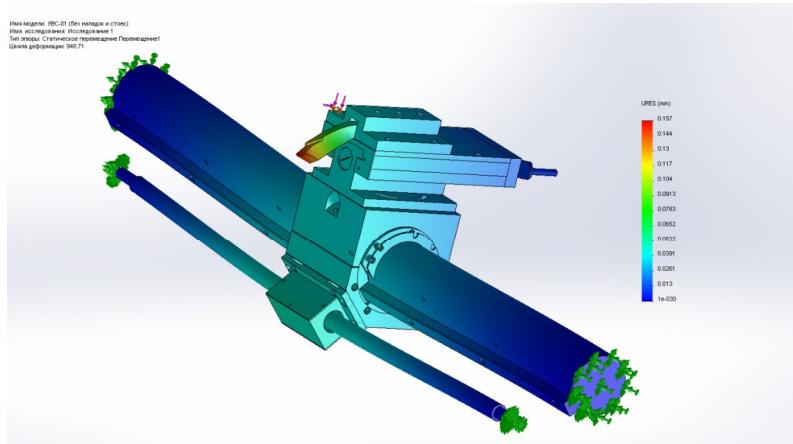


Рис. 10. Наложение ограничений на перемещения направляющей станка

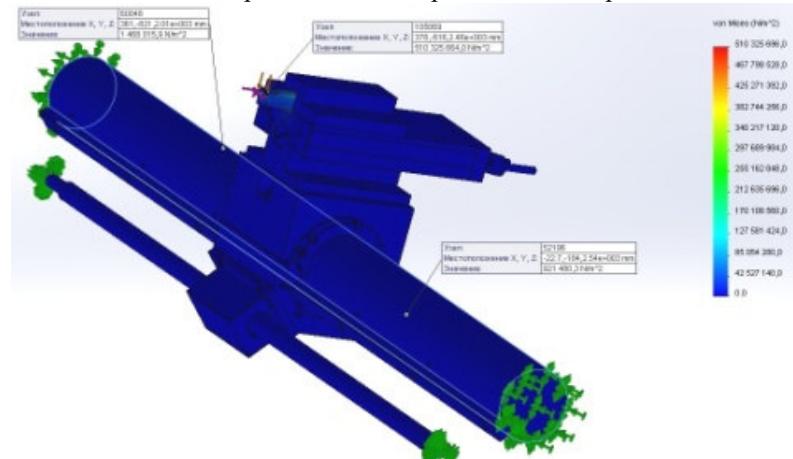


Рис. 11. Визуализация результатов расчета напряжений, возникающих в элементах технологической системы

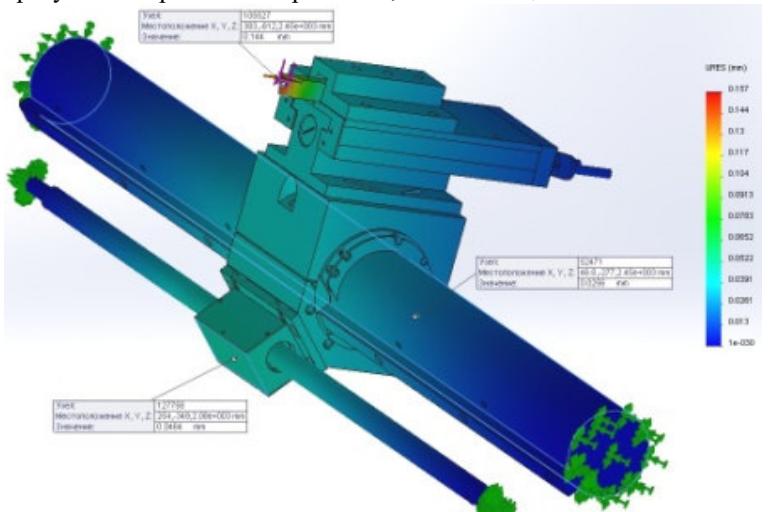


Рис. 12. Визуализация результатов расчета деформаций, возникающих в элементах конструкции станка

Результаты, полученные при моделировании напряженно-деформированного состояния элементов технологической системы, при соответствующем анализе величин смещения в технологической системе дают возможность установить зависимость между нагрузками от сил резания и отжатиями режущего инструмента. Таким образом моделирование дает возможность определить максимально допустимые режимы при

выполнении обработки поверхностей деталей опор для различных типоразмеров опор и различных схем наладок.

Одним из главных преимуществ рассматриваемого стакочного модуля является возможность его адаптации к различным типоразмерам опор. В табл. 2 приведены геометрические характеристики бандажей вращающихся печей, эксплуатируемых в цементной промышленности. Большинство вращающихся печей, в процессе

работы вращаются с частотой, примерно - 1 мин^{-1} . Очевидно, что при такой частоте вращения, линейная скорость движения поверхности качения, а значит и скорости резания, будет зависеть от диаметра бандажа. В табл. 2 приведены значения линейной скорости поверхности качения для различных типоразмеров бандажей.

Линейная скорость поверхностей качения бандажей (при частоте вращения печи - 1 мин^{-1})

Наружный диаметр бандажа D , мм	Линейная скорость, поверхности качения (скорость резания) V , м/мин	Длина поверхности качения, мм
3100	9,734	500
3700	11,62	550
3900	12,25	550
4300	13,5	700
4310	13,53	600
4850	15,23	800
5470	17,17	900
6100	19,15	1000
6250	19,62	1100
5800	21,35	1200
7750	24,33	1200
8450	26,53	1350

На выбор рациональных режимов для обработки рассматриваемых поверхностей, оказывают влияние технические возможности привода подач станка. Это минимальная и максимальная величины подачи, которые обеспечивает это станок. В соответствии с этим получены еще две линейные зависимости:

$$x_2 \leq b_5; x_2 \geq b_6, \quad (12)$$

где $x_2 = \ln(s)$, $b_5 = \ln(s_{max})$, $b_6 = \ln(s_{min})$. Устанавливаемый режим обработки зависит еще и от прочности применяемого режущего инструмента. Предел прочности применяемого резца на изгиб (σ_i), МПа, можно определить по формуле:

$$\sigma_i \geq \frac{M_{изг} \cdot k_{зп}}{W}, \quad (13)$$

где $M_{изг}$ – изгибающий момент, МПа, прикладываемый к резцу. Этот момент, мы можем определить по формуле:

$$M_{изг} = P_z \cdot l_p, \quad (14)$$

где P_z – тангенциальная составляющая силы резания, Н; l_p – вылет резца, мм; $k_{зп}$ – коэффициент запаса, который принимаем – 2,4; W – момент сопротивления державки инструмента, мм^2 , который определяется по формуле:

$$W = \frac{B_d \cdot H_d^2}{6}, \quad (15)$$

где B_d – высота сечения державки, мм; H_d – ширина державки, мм.

После преобразований, получим зависимость:

Из таблицы видно, существенное изменение скорости резания от минимального диаметра обработки до максимального (скорость резания изменяется почти в три раза). Согласно положениям теории резания [19], такое изменение будет сказываться на силовых параметрах резания, что в свою очередь скажется на величинах отжатий в технологической системе.

Таблица 2

Линейная скорость поверхностей качения бандажей (при частоте вращения печи - 1 мин^{-1})

$$t^{x_z} \cdot s^{y_z} \leq \frac{240 \cdot B_d \cdot H_d^2}{60 \cdot C_z \cdot V^{n_z} \cdot k_z \cdot l_p \cdot k_{зп}} \quad (16)$$

После логарифмирования и преобразования, получено еще одно линейное уравнение:

$$x_z \cdot x_1 + y_z \cdot x_2 \leq b_7 \quad (17)$$

Жесткость применяемого инструмента также будет оказывать влияние на режимы обработки.

Связь между наибольшей нагрузкой и жесткостью инструмента, можно описать следующей зависимостью:

$$P_{ж\ доп} = \frac{3 \cdot f \cdot E \cdot I}{l_p^3}, \quad (18)$$

где $f = 0,1 \text{ мм}$ – допустимая величина прогиба инструмента для условий обработки поверхностей качения; E – модуль упругости материала державки инструмента, ГПа; I – момент инерции сечения державки резца, мм^4 , который определим по следующей зависимости:

$$I = \frac{B_d \cdot H_d^3}{12} \quad (19)$$

Для обеспечения нормальных условий резания, необходимо обеспечить условие:

$$P_z \leq P_{ж\ доп} \quad (20)$$

После выполнения подстановки и преобразований, получена следующая зависимость:

$$t^{x_z} \cdot s^{y_z} \leq \frac{3 \cdot f \cdot E \cdot B_d \cdot H_d^3}{120 \cdot C_z \cdot V^{n_z} \cdot k_z \cdot l_p^3} \quad (21)$$

После логарифмирования и преобразования, получено еще одно линейное уравнение:

$$x_z \cdot x_1 + y_z \cdot x_2 \leq b_8 \quad (22)$$

Как известно, режимы обработки оказывают влияние не только на точность, но и на шероховатость (Ra), мкм, формируемых поверхностей. Воспользуемся известной зависимостью [15]:

$$Ra = \frac{0,85 \cdot t^{0,31} \cdot s^{0,58} \cdot \varphi^{0,4} \cdot \varphi_1^{0,4}}{v^{0,06} \cdot r^{0,65} \cdot HB^{0,05}}, \quad (23)$$

где $\varphi = 45^\circ$, $\varphi_1 = 45^\circ$, $r = 2$ мм – геометрические параметры применяемого инструмента; $HB = 180 \dots 220$ МПа – показатель твердости обрабатываемого материала.

После выполнения подстановки и преобразований, выражение, учитывающее зависимость от шероховатости будет иметь вид:

$$t^{0,31} \cdot s^{0,58} \leq \frac{Ra \cdot v^{0,06} \cdot r^{0,65} \cdot HB^{0,05}}{0,85 \cdot \varphi^{0,4} \cdot \varphi_1^{0,4}} \quad (24)$$

После логарифмирования и преобразования:

$$0,31 \cdot x_1 + 0,58 \cdot x_2 \leq b_9 \quad (25)$$

Полученные зависимости представляют собой систему неравенств, которая в сочетании с оценочной функцией, является математической моделью. Эта система имеет следующий вид:

$$\left. \begin{array}{l} x_v \cdot x_1 + y_v \cdot x_2 \leq b_1 \\ x_x \cdot x_1 + y_x \cdot x_2 \leq b_2 \\ x_1 \leq b_3 \\ x_1 \geq b_4 \\ x_2 \leq b_5 \\ x_2 \geq b_6 \\ x_z \cdot x_1 + y_z \cdot x_2 \leq b_7 \\ x_z \cdot x_1 + y_z \cdot x_2 \leq b_8 \\ 0,31 \cdot x_1 + 0,58 \cdot x_2 \leq b_9 \\ \hline f_0 = (x_1 + x_2)_{max} \end{array} \right\} \quad (26)$$

Выходы.

Полученная математическая в полной мере соответствует принятым схемам обработки, и отличается тем, что помимо технологических параметров обработки дополнительно учитывает напряженно-деформированное состояние в технологической системе, параметры которого зависят от размеров обрабатываемой поверхности. На основании этой модели можно определять рациональные режимы обработки поверхностей качения опор врачающихся печей в зависимости от их типоразмеров. Расчет режимов обработки на основе полученной модели обеспечит возможность сокращения времени

восстановления формы поверхностей опорных деталей непосредственно на агрегате в условиях эксплуатации.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

- Vijayan S.N., Sendhilkumar S. Industrial Applications of Rotary Kiln in Various Sectors - A Review. International Journal of Engineering Innovation & Research. 2014. Vol. 3. Pp. 342–345.
- Boaten A.A. Rotary Kilns. Elsevier Inc. Publ., 2015. 390 p.
- Design features of rotary kilns. [Электронный ресурс]. URL: https://www.cementkilns.co.uk/kiln_design.html. (дата обращения: 09.03.2025)
- Шрубченко И.В. Технологические основы обеспечения формы и условий контакта поверхностей качения опор технологических барабанов при обработке мобильным оборудованием: Дисс. докт. техн. наук / И.В. Шрубченко; МАИ, БГТУ им. В.Г. Шухова. М.: 2007. 373 с.
- Sanin S.N., Pelipenko N.A. Innovative technology of large-size products manufacture // Journal of Mining Institute 2018. Vol. 230. Pp. 185–189. DOI: 10.25515/PMI.2018.2.185
- Sanin S.N., Pelipenko N.A. Processing of a Large-Sized Cement Kiln Bandage by a Robotic Machine // New technologies in mechanical engineering. 2021. Vol. 50. Pp. 171–177. DOI: 10.3103/S1052618821020114
- Mogilny S., Sholomitskii A. Precision Analysis of Geometric Parameters for Rotating Machines during Cold Alignment // Procedia Engineering. 2017. Vol. 206. Pp. 1709–1715. DOI: 10.1016/j.proeng.2017.10.702
- Gavrilov D.V., Khurtasenko A.V., Voronkova M.N., Shrubchenko I.V., Bondarenko Y.A. More Efficient Machining of Parts with an Unsteady Rotational Axis // Russian Engineering Research. 2023. Vol. 43 (6). Pp. 723–726. DOI: 10.3103/S1068798X23060096
- Макаренко К.В., Азаркин А.А., Вдовин А.В. Анализ особенностей механики контакта бандажа и опорных роликов врачающихся печей // Наукоемкие технологии в машиностроении. 2025. №3. С. 38–48. DOI: 10.30987/2223-4608-2025-3-38-48
- Гончаров А.А., Утенков В.М., Иванов В.А. Восстановление врачающихся цементных печей на основе диагностики в процессе эксплуатации // Steel Transl. 2024. Vol. 54. Pp. 226–230. DOI: 10.3103/S0967091224700542
- Пат. № 125499, Российская Федерация, МПК B23B 5/00 (2006.01). Станок для обработки бандажей / Шрубченко И.В., Мурыгина Л.В., Рыбалко В.Ю.; заявитель и патентообладатель

БГТУ им. В.Г. Шухова. № 2012121121/02, заявл. 22.05.2012; опубл. 10.03.2013, Бюл. № 7.

12. Пат. № 118235, Российская Федерация, МПК B23B 5/00 (2006.01). Станок для обработки бандажей и роликов / Шрубченко И.В., Мурыгина Л.В., Рыбалко В.Ю., Черняев А.С.; заявитель и патентообладатель БГТУ им. В.Г. Шухова. № 2011151348/02, заявл. 15.12.2011; опубл. 20.07.2012, Бюл. № 20.

13. Пат. № 191596, Российская Федерация, МПК B23B 5/00 (2006.01). Станок для обработки поверхностей крупногабаритных деталей-тел вращения / С.П. Тимофеев, А.В. Хуртасенко, И.В. Шрубченко, М.Н. Воронкова; заявитель и патентообладатель БГТУ им. В.Г. Шухова. № 2019114537, заявл. 13.05.2019; опубл. 13.08.2019, Бюл. № 23

14. Шрубченко И.В. О периодичности обработки поверхностей качения бандажей и роликов вращающихся цементных печей // Промышленность строительных материалов. Серия 1. Цементная промышленность. 2003. Вып. 1-2. С. 16–20.

15. Мурыгина Л.В., Почепцов Н.А., Гусинская А.Ю., Шрубченко И.В. Методика определения периодичности обработки поверхностей качения опор технологических барабанов // Наука и молодежь в начале нового столетия: сб. докл. Международной науч.-практ. конф. студ., аспир. и молодых ученых, Губкин, 2010г. / Губкин. филиал БГТУ им. В.Г. Шухова. Губкин: Изд-во ИП Уваров В.М., 2010. С.85–89.

16. Portable belt grinding machine for on-site kiln and drier support roller restoration. SMF800

Информация об авторах

Шрубченко Иван Васильевич, доктор технических наук, профессор кафедры технологии машиностроения. E-mail: ivshrub@yandex.ru. Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова. Россия, 308012, Белгород, ул. Костюкова, д. 46.

Хуртасенко Андрей Владимирович, кандидат технических наук, доцент кафедры технологии машиностроения. E-mail: hurtintbel@mail.ru. Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова. Россия, 308012, Белгород, ул. Костюкова, д. 46.

Бондаренко Юлия Анатольевна, доктор технических наук, профессор кафедры технологии машиностроения. E-mail: kdsm2002@mail.ru. Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова. Россия, 308012, Белгород, ул. Костюкова, д. 46.

Воронкова Марина Николаевна, кандидат технических наук, доцент кафедры технологии машиностроения. E-mail: mkuzko@mail.ru. Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова. Россия, 308012, Белгород, ул. Костюкова, д. 46.

Поступила 27.05.2025 г.

© Шрубченко И.В., Хуртасенко А.В., Бондаренко Ю.А., Воронкова М.Н., 2026

Kiln Rollers Grinding Machine. Adobe AcrobatReader. URL: <https://portable.onsite-machines.com/wp-content/uploads/2021/01/EUREKA-SMF800-V.2020-05.pdf> (date of treatment: 10.06.2025)

17. Mechanical condition monitoring on rotary kilns. Measurement Tools for the Cement Industry. Adobe AcrobatReader. URL: <https://tomtomtools.com/wp-content/uploads/2020/08/Measurement-Tools-For-The-Cement-Industry-14.pdf> (date of treatment: 10.06.2025)

18. Универсальный встраиваемый станок УВС-01 / Федеральный каталог высокотехнологичного оборудования и объектов научного потенциала России. [Электронный ресурс]. Режим доступа: URL: <https://каталог-нп.рф/project/281>. (Universal Embedded Machine UEM-01 / Federal catalog of high-tech equipment and objects of scientific potential of Russia. [Electronic resource]. Access mode: URL: <https://каталог-нп.рф/project/281>)

19. Справочник технолога-машиностроителя: в 2 т. Т.1 / Под ред. А.М. Дальского, А.Т. Косиловой, Р.К. Мещерякова, А.Г. Суслова. 5-е изд., перераб. и доп. М.: Машиностроение, 2001. 912 с.

20. Захаров О.В. Минимизация погрешностей формообразования при бесцентровой абразивной обработке. Саратов: СГТУ, 2006. 152 с.

21. Захаров О.В. Стабильность силового замыкания контакта при бесцентровом шлифовании на неподвижных опорах // СТИН. 2011. № 7. С. 8–10.

***Shrubchenko I.V., Khurtasenko A.V., Bondarenko Y.A., Voronkova M.N.**
Belgorod State Technological University named after V.G. Shukhov
**E-mail:ivshrub@yandex.ru*

TOWARDS THE DETERMINATION OF MODES FOR MOBILE TECHNOLOGY FOR PROCESSING LARGE-SIZED ROLLING SURFACES

Abstract. The article considers the features of determining rational modes of machining rolling surfaces of rotary kiln supports using mobile technologies. It is proposed to estimate the service life of rotary kiln supports to determine the frequency of restorative machining of rolling surfaces. It is shown that this approach is feasible from the point of view of correct forecasting and determining the timing of the necessary restorative machining of the working surfaces of support parts to ensure reliable operability of the units. It provides a rationale for using the most efficient designs of mobile machine modules that ensure efficient restoration of the shape and size of large-sized rotating parts. A number of dependencies are proposed for determining rational machining modes. These dependencies take into account all technological machining modes that have the greatest impact on the quality parameters of the machined surfaces. It is proposed to use a finite element analysis software package to study deformations in the technological system. The sequence of modeling and evaluation of the stress-strain state of the built-in machine is given for various schemes of machining rolling surfaces of support rollers and tires of rotary kilns. A mathematical model has been obtained that will allow using the linear programming method to obtain rational modes for restorative treatment of surfaces of rotary cement kilns using mobile technologies.

Keywords: mobile technologies, special portable machine, rolling bearings of a rotary kiln, finite element analysis, mean time between failures.

REFERENCES

1. Vijayan S.N., Sendhil Kumar S. Industrial Applications of Rotary Kiln in Various Sectors - A Review. *International Journal of Engineering Innovation & Research.* 2014. Vol. 3. Pp. 342–345.
2. Boaten A.A. *Rotary Kilns.* Elsevier Inc. Publ., 2015. 390 p.
3. Design features of rotary kilns. URL: https://www.cementkilns.co.uk/kiln_design.html.
4. Shrubchenko I.V. Technological principles of ensuring the shape and conditions of contact of rolling surfaces of technological drum supports during processing with mobile equipment. [Tekhnologicheskiye osnovy obespecheniya formy i usloviy kontakta poverkhnostey kacheniya opor tekhnologicheskikh barabanov pri obrabotke mobilnym oborudovaniyem]. Moscow: Ministry of Transport of Russia. Federal road agency. 2010. Pp. 18–26. (rus)
5. Sanin S. N., Pelipenko N. A. Innovative technology of large-size products manufacture. *Journal of Mining Institute* 2018. Vol. 230. Pp. 185–189. DOI: 10.25515/PMI.2018.2.185
6. Sanin S.N., Pelipenko N.A. Processing of a Large-Sized Cement Kiln Bandage by a Robotic Machine. *New technologies in mechanical engineering.* 2021. Vol. 50. Pp. 171–177. DOI: 10.3103/S1052618821020114
7. Mogilny S., Sholomitskii A. Precision Analysis of Geometric Parameters for Rotating Machines during Cold Alignment. *Procedia Engineering.* 2017. Vol. 206. Pp. 1709–1715. DOI: 10.1016/j.proeng.2017.10.702
8. Gavrilov D.V., Khurtasenko A.V., Voronkova M.N., Shrubchenko I.V., Bondarenko Y.A. More Efficient Machining of Parts with an Unsteady Rotational Axis. *Russian Engineering Research.* 2023. Vol. 43 (6). Pp. 723–726. DOI: 10.3103/S1068798X23060096
9. Makarenko K.V., Azarkin A.A., Vdovin A.V. Analysis of contact mechanics of a bandage and support rolls of rotary kilns. *Science intensive technologies in mechanical engineering.* 2025. No. 3. Pp. 38–48. DOI: 10.30987/2223-4608-2025-3-38-48) (rus)
10. Goncharov, A.A., Utenkov, V.M. & Ivanov, V.A. Restoration of Rotary Cement Kilns Based on Diagnostics During Operation. *Steel Transl.* 2024. Vol. 54. Pp. 226–230. DOI: 10.3103/S0967091224700542 (rus)
11. Shrubchenko I.V., Murygina L.V., Rybalko V.Y. Machine for processing tires. Patent RF, No. 125499, 2013. (rus)
12. Shrubchenko I.V., Murygina L.V., Rybalko V.YU., Chernyaev A.S. Machine for processing tires and rollers. Patent RF, No. 118235, 2012. (rus)
13. Timofeev S.P., Hurtasenko A.V., Shrubchenko I.V., Voronkova M.N. Machine for surface treatment of large-sized parts-bodies of rotation. Patent RF, No. 191596, 2019. (rus)
14. Shrubchenko I.V. On the periodicity of treatment of rolling surfaces of tires and rollers of rotary cement kilns. [O periodichnosti obrabotki poverhnostej kacheniya bandazhej i rolikov vrashchayushchihsya cementnyh pechej]. *Promyshlennost' stroitel'nyh materialov. Seriya 1. Cementnaya*

promyshlennost'. 2003. No. 1-2 (VNIIESM). Pp. 16–20. (rus)

15. Murygina L.V., Pocheprcov N.A., Gusinskaya A.Yu., Shrubchenko I.V. Methodology for determining the periodicity of processing rolling surfaces of technological drum supports [Metodika opredeleniya periodichnosti obrabotki poverhnostej kacheniya opor tekhnologicheskikh barabanov]. Nauka i molodezh' v nachale novogo stoletiya: sb. dokl. Mezhdunarodnoj nauch.-prakt. konf. stud., aspir. i molodyh uchenyh, Gubkin, 2010g. Gubkin. filial BGTU im. V.G SHuhova. Gubkin: Izd-vo IP Uvarov V.M., 2010. Pp. 85–89. (rus)

16. Portable belt grinding machine for on-site kiln and drier support roller restoration. SMF800 Kiln Rollers Grinding Machine. Adobe AcrobatReader. URL: <https://portable.onsite-machines.com/wp-content/uploads/2021/01/EUREKA-SMF800-V.2020-05.pdf> (date of treatment: 10.06.2025)

17. Mechanical condition monitoring on rotary kilns. measurement tools for the cement industry. adobeacrobatreader. URL: <https://tomtomtools.com/wp-content/up->

loads/2020/08/Measurement-Tools-For-The-Cement-Industry-14.pdf (date of treatment: 10.06.2025)

18. Universal Embedded Machine UEM-01. Federal catalog of high-tech equipment and objects of scientific potential of Russia [Universal'nyj vstrai-vаемый станок UVS-01. Federal'nyj katalog vysokotekhnologichnogo oborudovaniya i ob"ektov nauchnogo potenciala Rossii]. URL: <https://katalog-np.rf/project/281> (rus)

19. Dal'skij A.M., Kosilova A.T., Meshcheryakov R.K., Suslov A.G. Handbook of a mechanical engineer [Spravochnik tekhnologa-mashinostroitelya]. Vol. 1. M.: Mashinostroenie, 2001. 912 p. (rus)

20. Zaharov O.V. Minimizing shaping errors in centerless abrasive machining [Minimizaciya pogreshnostej formoobrazovaniya pri bescentrovoj abrazivnoj obrabotke]. Saratov: SGTU, 2006. 152 p. (rus)

21. Zaharov O.V. Stability of the force closure of the contact during centerless grinding on fixed supports. [Stabil'nost' silovogo zamykaniya kontakta pri bescentrovom shlifovanii na nepodvizhnnyh oporah]. Russian Engineering Research. 2011. No. 7. Pp. 8–10. (rus)

Received 27.05.2025

Для цитирования:

Шрубченко И.В., Хуртасенко А.В., Бондаренко Ю.А., Воронкова М.Н. К определению режимов для мобильной технологии обработки крупногабаритных поверхностей качения // Вестник БГТУ им. В.Г. Шухова. 2026. № 1. С. 96–108. DOI: 10.34031/2071-7318-2025-11-1-96-108

For citation:

Shrubchenko I.V., Khurtasenko A.V., Bondarenko Y.A., Voronkova M.N. Towards the determination of modes for mobile technology for processing large-sized rolling surfaces. Bulletin of BSTU named after V.G. Shukhov. 2026. No. 1. Pp. 96–108. DOI: 10.34031/2071-7318-2025-11-1-96-108