

DOI: 10.12737/article\_58e613378c7037.64936691

Шрубченко И.В., д-р техн. наук, проф.,  
Хуртасенко А.В., канд. техн. наук, доц.,  
Гончаров М.С., аспирант

Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова

## КОНТАКТНЫЕ ПРОЯВЛЕНИЯ ПРОЦЕССА РЕЗАНИЯ ПРИ ВОССТАНОВИТЕЛЬНОЙ ОБРАБОТКЕ БАНДАЖЕЙ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ БАРАБАНОВ

msgon@ya.ru

Рассмотрено контактное взаимодействие опорного ролика и бандажа технологического барабана. Составлены расчетные модели позволяющие исследовать влияние процесса обработки на пятно контакта. Проанализировано изменение контактных напряжений при различном пути и глубине резания. Определены условия образования зазоров. Предложены технологические способы, обеспечивающие сохранение контактной прочности рабочих поверхностей бандажа и ролика в процессе обработки. Расчеты выполнены в среде NX Advanced Simulation Расширенная симуляция (Siemens PLM Software Inc.).

**Ключевые слова:** мобильные технологии, технологические барабаны, бандажи, опорные ролики, контактная прочность, пятно контакта.

**Введение.** Мобильные технологии восстановительной обработки крупногабаритных деталей находят все более широкое применение в ремонтном сервисе промышленного оборудования содержащего технологические барабаны (ТБ) [1, 2, 3, 4].

Особенностью таких технологий является восстановительная обработка поврежденных деталей без остановки производства в работающем агрегате. Такое воздействие обязательно оказывает влияние на движение всего ТБ. Например, изменение в процессе обработки размеров и формы поверхностей качения бандажей и опорных роликов при многоопорном базировании корпуса ТБ влияет на его равновесие, может привести к изменению над ремонтируемой опорой положения оси вращения ТБ и как следствие возрастанию сопротивлений движению, увеличению прогибов корпуса ТБ и появлению нежелательных деформаций.

Это скажется не только на напряженно-деформированном состоянии поверхностных слоев материала на пятне контакта между бандажом и роликом, но и на контакте инструмента с обрабатываемой поверхностью, т.е. может повлиять на результат самой обработки.

Таким образом, не смотря на многочисленные позитивные результаты исследований в этой области [5, 6, 7, 8, 9, 10, 11], остаются не ясными условия при которых восстановительная обработка бандажей не окажет негативного влияния на функционирование ТБ и контактную прочность поверхностей качения бандажа и опорного ролика.

Поэтому, представляет интерес анализ влияния процесса восстановительной обработки

профиля бандажа на контактную прочность поверхностей качения и в целом на функционирование технологического барабана.

**Методика исследования.** Поставленную задачу будем рассматривать при следующих допущениях:

1. Механическая обработка проводится при постоянной температуре (тепловые деформации не учитываются).
2. На корпус ТБ от его привода действует только постоянный крутящий момент (изгибающие, осевые, упругие и инерционные нагрузки не учитываются).
3. Бандаж вращается вместе с корпусом ТБ (проскальзывания между ними отсутствуют) с постоянной скоростью.
4. Между бандажом и опорными роликами скольжение отсутствует.
5. Опоры роликов не имеют погрешностей и являются абсолютно жесткими.
6. Ролики имеют номинальные форму и размеры.

Рассмотрим влияние механической обработки поверхности качения на пятно контакта между бандажом и роликом. Используем для этого конечно-элементную модель (рис. 1) построенную в NX Advanced Simulation Расширенная симуляция (Siemens PLM Software Inc.) [12, 13].

Внесем в модель небольшие изменения. Ролик по-прежнему будем представлять полым неподвижным (по всем осям координат) цилиндром (с размерами: длина 1100 мм, внешний диаметр – 1500 мм, внутренний диаметр – 600 мм). А на поверхности качения бандажа, моделируемого в виде цилиндрического сегмента

(длина 1000 мм, внешний диаметр – 6100 мм, внутренний диаметр – 4550 мм), выделим участок прошедший механическую обработку. Обозначим его как участок 1, а оставшуюся необработанную поверхность соответственно участок 2. Будем считать, что на всем протяжении

участка 1, определяемом (слева на право) по направлению продольной подачи, радиус профиля наружной поверхности меньше исходного на величину глубины резания. Это является причиной изменения пятна контакта вплоть до появления зазора.

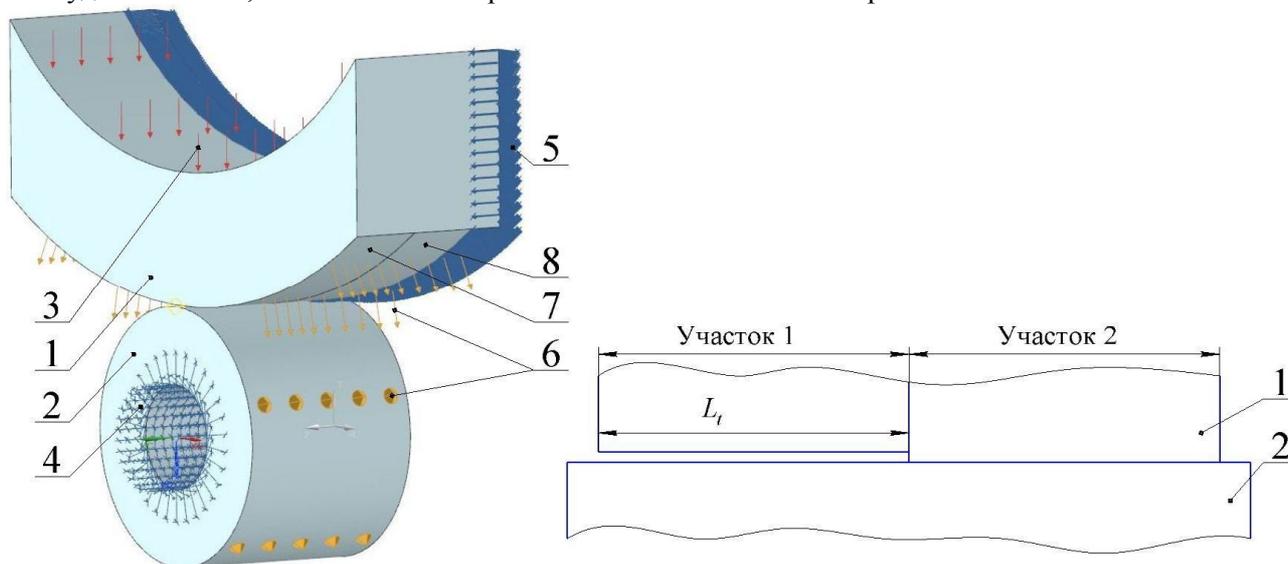


Рис. 1. Расчетная модель взаимодействия в процессе обработки бандажа и ролика:  
1 – модель бандажа; 2 – модель ролика; 3 – нагрузка; 4 – ограничение ролика: цилиндрический шарнир;  
5 – ограничение бандажа по торцевой грани; 6 – контакт поверхность-поверхность;  
7 – участок 1 (обработанная поверхность); 8 – поверхность участка 2;  $L_t$  – длина обработки

Для того чтобы учитывать изменение зазора на этом участке под действием на бандаж изгибающей нагрузки, будем варьировать закреплением по его торцевым граням, оставляя неизменным поступательное перемещение в вертикальном направлении (рис.1).

Кроме того, для идентификации зазора в пределах контактной зоны в свойствах контакта «поверхность-поверхность» задаем параметры таким образом, чтобы в диапазоне поиска на участке 2 все зазоры и проникновения были обработаны как соприкосновения [14]. На участке 1 это требование не устанавливаем.

Материал бандажа сталь 30ГСЛ по ГОСТ 977-88 ( $\sigma_T = 343\text{--}392$  МПа,  $HV = 180$ ,  $\sigma_B = 589\text{--}638$  МПа), коэффициент Пуассона  $\mu=0,3$  и модуль продольной упругости  $E=2 \cdot 10^5$  МПа.

Экспериментальные исследования изменения контактной прочности при механической обработке бандажей и роликов на практике не проводились. Сведения о допустимых для та-

ких условий контактных напряжениях отсутствуют.

Возьмем за основу допустимые контактные напряжения в диапазоне  $[\sigma_H] = 830\text{--}1030$  МПа, которые применяют при проектировании цементных вращающихся печей (как цилиндров, перекачивающихся без смазочного материала) [15]. Выясним, какое из этих значений можно использовать как предельное контактное напряжение для рассматриваемых условий при сохранении достоверности выводов.

Для этого оценим пластические деформации при контактном напряжении равном допустимому. Опасная точка испытывает объемное напряженное состояние близкое к равномерному сжатию и расположена в глубине поверхностного слоя материала бандажа.

Наибольшие касательные напряжения при контактных напряжениях  $\sigma_{max}$  из рассматриваемого диапазона:

$$\tau_{max1} = 0,31 \cdot \sigma_{max1} = 0,31 \cdot 830 = 257 \text{ МПа}, \quad \tau_{max2} = 0,31 \cdot \sigma_{max2} = 0,31 \cdot 1030 = 319 \text{ МПа}.$$

Предел текучести по касательным напряжениям (по третьей гипотезе прочности):

$$\tau_T = \sigma_T / 2 = 392 / 2 = 196 \text{ МПа}.$$

Поскольку  $\tau_{max1}$  и  $\tau_{max2}$  превышают значение предела текучести  $\tau_T$ , то при таких значениях

контактных напряжений неизбежны пластические деформации, особенно в глубине поверхностного слоя, которые могут быть допущены только при действии в процессе обработки не продолжительной нагрузки близкой к статической. Поэтому при анализе напряженного состо-

нения внутри пятна контакта в качестве ограничения сверху контактных напряжений принимаем  $[\sigma_{\text{H}}] = 830$  МПа.

Считаем, что нагрузка от корпуса ТБ действует на внутреннюю поверхность банджа, равномерно распределяется по внутренней поверхности сегмента, направлена вертикально

вниз и равна  $F = 4$  МН. В качестве решателя используем Nx Nastran.

Результаты расчетов демонстрируют, что в исходном положении (до обработки, см. строку  $L_t=0$  в табл. 1) контактные напряжения  $\sigma_{\text{H}}$  лишь на краях пятна контакта увеличиваются до максимального напряжения 347 МПа, а в остальной его части изменяются незначительно.

Таблица 1

**Изменение максимальных контактных напряжений (МПа) в точках пятна контакта при различном пути  $L_t$  резания с глубиной 0,4 мм**

$L_t$ , мм	Расстояния от начала пути резания (слева направо), мм											
	0	100	200	300	400	500	600	700	800	900	950	1000
0	336	340	312	314	312	314	315	309	321	342	342	347
100	0	0/433	396	381	359	342	337	337	339	339	369	388
200	0	0	0/498	475	396	382	371	375	373	361	413	404
300	0	0	0	0/566	564	482	431	424	423	413	455	482
400	0	0	0	0	0/610	604	525	481	473	495	497	551
500	18	15	10	5	0	0/686	686	650	585	551	570	606
600	74	77	74	64	35	15	5/798	723	700	702	644	740
700	113	127	132	116	107	100	82	79/806	766	759	627	629
800	166	183	195	176	168	173	150	83	35/871	814	789	817
900	213	235	245	226	228	233	221	214	123	1/954	1033	1117

Примечание: дробные значения в конце каждого пути резания связаны со скачкообразным изменением контактных напряжений. Первое значение соответствует напряжениям на участке 1, а второе на участке 2.

С началом обработки эта картина меняется (табл. 1). При глубине резания  $t=0,1$  мм в начале обработки (при  $L_t=100$  мм) контактные напряжения на участке 1 составляют только 27% от исходных  $\sigma_{\text{H}}$ . Это говорит о том, что в результате резания между поверхностями контакта появляется зазор, который компенсируется упругой деформацией банджа. С увеличением пути резания она увеличивается, и напряжения возрастают, но никогда не возвращаются к исходным  $\sigma_{\text{H}}$ . При  $t=0,2$  мм эта тенденция сохраняется (при  $L_t=100$  мм напряжения 6% от  $\sigma_{\text{H}}$ ) и зазоры отсутствуют.

На участке 2 при завершении прохода в конце пути резания контактные напряжения всегда превышают допускаемые  $[\sigma_{\text{H}}]$ . Например, при  $t=0,06$  мм и  $L_t=980$  мм максимальные контактные напряжения в зоне контакта  $\sigma_{\text{H}}=1211$  МПа  $>$   $[\sigma_{\text{H}}]=830$  МПа.

Так же установлено, что при обработке с глубиной резания больше 0,2 мм существует такой путь резания  $L_{t0}$ , при котором зазор присутствует на всем протяжении участка 1. Если для  $t=0,3$  мм это расстояние  $L_{t0}=200$  мм, а для

$t=0,4$  мм уже  $L_{t0}=400$  мм (табл. 1), то при  $t$  от 1 мм до 1,2 мм оно достигает  $L_{t0}=800$  мм.

Начиная от глубины резания  $t=1,3$  мм, зазор сохраняется на всем пути резания. При этом контактные напряжения на участке 2 уже не зависят от глубины резания и по отношению к исходным напряжениям  $\sigma_{\text{H}}$  в зависимости от пути резания изменяются всегда одинаково (табл. 2).

Таким образом, с увеличением пути резания на участке 2 возникает опасный для контактной прочности многократный рост напряжений. С другой стороны такая тенденция доказывает то, что на участке 2 осуществляется перманентное базирование банджа по поверхности ролика и, следовательно, при механической обработке сохраняется номинальное центрирование оси вращения корпуса ТБ.

Поэтому для предупреждения повреждений поверхностей качения следует выполнять, по меньшей мере, два условия: 1) проводить обработку с малой глубиной резания (меньше 1 мм), 2) для завершения каждого пути резания выбирать такой способ обработки, который обеспечивает сохранение контактной прочности поверхности качения, как банджа, так и ролика.

Таблица 2

**Отношение максимальных и исходных контактных напряжений в точках пятна контакта для глубин резания больше 1,2 мм при различном пути  $L_1$  резания**

$L_1$ , мм	Расстояния от начала пути резания (слева направо), мм										
	100	200	300	400	500	600	700	800	900	950	1000
100	1,28	1,28	1,22	1,15	1,08	1,07	1,09	1,05	1	1,08	1,12
200	0	1,62	1,52	1,26	1,22	1,18	1,21	1,16	1,06	1,20	1,17
300	0	0	1,65	1,83	1,59	1,29	1,39	1,32	1,21	1,33	1,39
400	0	0	0	1,91	1,92	1,82	1,69	1,53	1,45	1,44	1,63
500	0	0	0	0	2,16	2,19	2,09	1,83	1,61	1,68	1,75
600	0	0	0	0	0	2,53	2,41	2,36	2,18	1,96	2,20
700	0	0	0	0	0	0	2,88	2,69	2,41	1,98	1,93
800	0	0	0	0	0	0	0	3,48	3,00	2,98	3,17
900	0	0	0	0	0	0	0	0	4,13	4,82	5,43

Для выполнения второго условия следует сначала (независимо от глубины резания  $t$ ) выбрать такой максимальный путь резания  $L_1$  чтобы контактные напряжения на участке 2 не превышали допусковые. Тогда этот оставшийся

участок можно будет обработать врезным шлифованием (без увеличения при этом контактных напряжений), если согласовать его длину с шириной абразивного инструмента

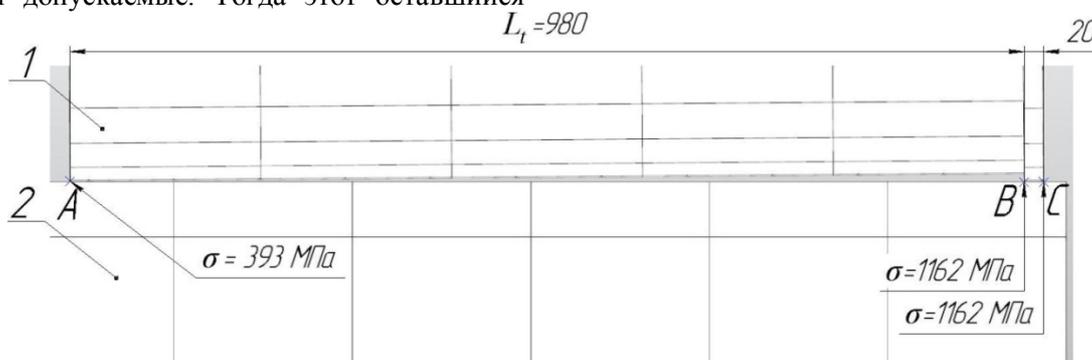


Рис. 2. Моделирование контакта бандажа с роликом в конце рабочего хода: модели бандажа и ролика соответственно 1 и 2; АВ и ВС – длины участков соответственно 1 и 2

При этом следует учитывать то, что в конце односторонней обработки (когда направление продольной подачи не изменяется на протяжении всего прохода) с уменьшением длины участка 2 увеличивается тенденция к повороту бандажа в вертикальной плоскости продольного сечения корпуса ТБ (рис. 2).

Допуская, при  $t=0,1$  мм и  $L_1=980$  мм, возможность поворота бандажа (ввиду малости таких перемещений) найдем изменение при этом контактных напряжений. Преобразуем расчетную модель (рис. 2): 1) на уровне сборки синтезируем новое положение, таким образом, чтобы сопряжение сборки «касание» находилось в точках А и В; 2) назначаем закрепление по горизонтали только для внутренней поверхности сегмента.

Тогда по результатам расчетов получаем, что контактное напряжение в т. А увеличилось с 282 МПа до 393 МПа, а на участке 2 (отрезок ВС на рис. 2) уменьшилось с 1397 МПа только до 1162 МПа, по-прежнему превышая допусковое.

Os00\_sim7 : Solution 1 Result  
Subcase - Static Loads 1, Статический шаг 1  
Контактное давление - По узлам, Скаляр  
Мин.: 0.00, Макс.: 513.10, Единицы = Н/мм<sup>2</sup>(МПа)

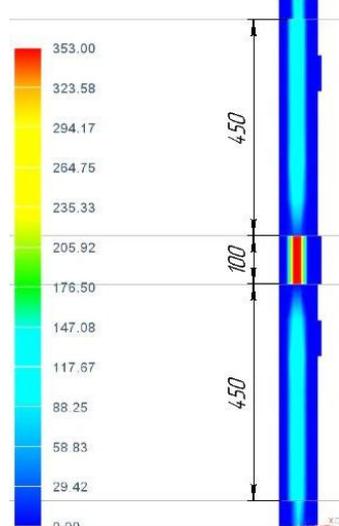


Рис. 3. Карта контактных напряжений при двухсторонней (длина участков 450 мм) обработке бандажа (длина 1000 мм) с глубиной резания 0,1 мм. Если завершать обработку по середине ширины бандажа (рис. 3) тогда ценой уменьшения производительности (вследствие прерывистой

двусторонней продольной подачи) можно на участке 2 уменьшить контактные напряжения (табл. 3), исключить возникновение кромочных повреждений и сохранить центрирование оси корпуса ТБ. При обработке этого участка шлифованием контактные напряжения на нем будут уменьшаться (а на соседних участках увеличиваться) в последовательности обратной их изменению при увеличении глубины резания (см. табл. 3).

В некоторых случаях при эксплуатации ТБ образующие бандажа и опорного ролика располагаются под углом друг к другу [13]. Это несколько уменьшает контактные напряжения в конце прохода на участке 2. Например, при повороте в расчетной модели оси вращения опор-

ного ролика вокруг точки расположенной на середине длины бандажа на угол  $\gamma = 2^\circ$  контактные напряжения уменьшаются с 1397 МПа до 1223 МПа, что все-таки недостаточно для сохранения контактной прочности.

Следует отметить, что рассмотренные варианты напряженного состояния в поверхностном слое площадок качения в первую очередь опасны для материала опорного ролика. Это связано с тем, что испытывшие перегрузку точки поверхностного слоя бандажа при следующем проходе удаляются, а материал поверхности ролика многократно (вплоть до окончания обработки) подвергается перегрузке.

Таблица 3

**Изменение максимальных контактных напряжений (МПа) в точках пятна контакта при различной глубине резания и двусторонней обработке с длиной завершающего участка 100 мм**

t, мм	Расстояния от начала пути резания (левого торца бандажа), мм											
	0	100	200	300	400	450	550	600	700	800	900	1000
0	336	340	312	314	312	314	314	315	309	321	342	347
0,1	116	127	117	90	2	353	353	21	147	132	138	138
0,3	97	98	95	109	68	585	585	68	109	97	109	110
0,5	67	70	69	66	42	816	816	44	71	64	80	82
0,7	45	43	39	25	17	1041	1041	18	28	32	49	52
1	0	0	0	0	0	1285	1285	0	0	0	0	0
1,2	0	0	0	0	0	1285	1285	0	0	0	0	0

Кроме того, зазоры, возникающие при обработке, изменяют контакт бандажа с базовой поверхностью опорного ролика, что в зависимости от конструкции и расположения переносных станков может влиять на формообразование.

Таким образом, из всех рассмотренных способов восстановительной неуправляемой обработки бандажа с точки зрения сохранения базирования и контактной прочности поверхностей бандажа и ролика целесообразна обработка с центральным завершающим участком.

**Выводы.** Из исследования процесса восстановительной обработки бандажей следует:

1. Механическая обработка бандажа переносными станками вызывает контактную перегрузку поверхностей бандажа и ролика. В конце каждого прохода независимо от глубины резания контактные напряжения превышают допустимые.

2. При односторонней обработке в конце пути резания поворот бандажа в пределах зазора нарушает центрирование корпуса ТБ и вызывает деформации обечайки.

3. Для сохранения контактной прочности поверхностей качения бандажа и ролика необходимо завершать каждый проход врезным шлифованием заключительного участка. При этом для исключения перегрузки обечайки бу-

дет лучше, если его выполнить по середине длины бандажа.

### БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. ООО «ЦемСервис» [Электронный ресурс]. URL: <http://xn--blafanzfelb.xn--p1ai/uslugi.html> (20.03.2017).
2. ООО «МосХимЦемСервис» технологическое обслуживание и восстановление промышленного оборудования [Электронный ресурс]. URL: [http://moshimtsemservis.ru/index.php?option=com\\_content&view=article&id=1:o-kmpanii&catid=2](http://moshimtsemservis.ru/index.php?option=com_content&view=article&id=1:o-kmpanii&catid=2) (20.03.2017).
3. Ozek Makina [Электронный ресурс]. URL: <http://www.rotarykiln.net/> (20.03.2017).
4. Phillips Kiln Services [Электронный ресурс]. URL: <http://www.pkse.co.uk/services/resurfacing.php> (20.03.2017).
5. Дуганов В. Я. Определение передаточных отношений и коэффициента исправления формы деформированного кольца цементных печей при его бесцентровой обработке//Ремонт, восстановление, модернизация. 2013. № 9. С. 47–51.

6. Бондаренко Ю.А., Федоренко М.А., Погонин А.А. Определение возможности обработки крупногабаритных деталей на приставных станках//СТИН. 2005. № 7. С. 37-38.

7. Дуюн Т.А., Гринек А.В., Сахаров Д.В. Моделирование и оптимизация технологических процессов изготовления изделий с использованием метода динамического программирования // Вестник БГТУ им. В.Г. Шухова. 2013. №3. С. 61–65.

8. Захаров О.В. Моделирование образования погрешностей формы заготовок при бесцентровом суперфинишировании // Автоматизация и современные технологии. 2010. № 11. С. 11–15.

9. Колобов А. В. Технологическое обеспечение условий контакта при сборке и эксплуатации опор технологических барабанов : Автореф. дис. канд. техн. наук. Белгород, 2009. 20 с.

10. Маслова И.В., Блудов А.Н. Обоснование использования управляемого процесса при восстановлении формы крупногабаритного тела вращения, не имеющего стационарную ось вращения// Вестник Белгородского государственного технологического университета им. В.Г. Шухова. 2012. №3. С. 76–79.

11. Погонин А.А., Бондаренко В.Н., Санин С.Н., Схиртладзе А.Г. Ремонтно-

восстановительная обработка поверхностей катания опорных узлов цементных печей мобильными станками // Ремонт, восстановление, модернизация. 2005. №1. С. 13–16.

12. Гончаров М.С., Хуртасенко А.В., Шрубченко И.В. Компьютерное моделирование контакта бандажа и ролика / Сб. докл. Междунар. научно-практической конф., посвященной 60-летию БГТУ им. В.Г. Шухова «Наукоемкие технологии и инновации» (XXI научные чтения) // Белгор. гос. Технол. ун-т. (Белгород, 9-10 октября 2014г.), Белгород: Изд-во БГТУ им. В.Г. Шухова, 2014. С. 216–222.

13. Шрубченко И.В., Хуртасенко А.В., Гончаров М.С. Контактные проявления погрешности формы и расположения в технологических барабанах // Вестник Белгородского государственного технологического университета им. В.Г. Шухова. 2016. № 2. С. 81–85.

14. Гончаров П.С., Артамонов И. А., Халитов Т. Ф., Денисихин С. В., Сотник Д. Е. NX Advanced Simulation. Инженерный анализ. М.: ДМК Пресс, 2012. 504с.

15. Лоскутов Ю. А. Максимов В.М., Веселовский В.В. Механическое оборудование предприятий по производству вяжущих строительных материалов: Учебник. М: Машиностроение, 1986. 376 с.

---

**Shrubchenko I.V., Hurtasenko A.V., Goncharov M.S.**

**CONTACT MANIFESTATIONS OF THE CUTTING PROCESS  
AT RESTORATIVE TREATMENT OF BANDAGES TECHNOLOGICAL DRUM**

*Considered the contact interaction support roller and bandage technological drum. Compiled calculation models are made that allow investigating the influence of the processing process on the contact spot. Analyzed the change in contact stresses for a different path and depth of cutting. Identified conditions emergence clearances. Proposed technological ways that ensure the preservation of the contact strength of the working surfaces of the bandage and roller during the processing. The calculations are performed in the environment of NX Advanced Simulation Advanced Simulation (Siemens PLM Software Inc.).*

**Key words:** mobile technologies, technological drums, bandages, support rollers, contact strength, contact spot.

---

**Шрубченко Иван Васильевич**, доктор технических наук, профессор кафедры технологии машиностроения Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова  
Адрес: Россия, 308012, Белгород, ул. Костюкова, д. 46

**Хуртасенко Андрей Владимирович**, кандидат технических наук, доцент кафедры технологии машиностроения Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова  
Адрес: Россия, 308012, Белгород, ул. Костюкова, д. 46

**Гончаров Михаил Сергеевич**, аспирант кафедры технологии машиностроения Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова  
Адрес: Россия, 308012, Белгород, ул. Костюкова, д. 46  
E-mail: msgon@ya.ru