УДК 676:621.9.042

А. А. Жолобов, канд. техн. наук, проф., В. А. Логвин

ОСОБЕННОСТИ ОБРАБОТКИ НАБИВНЫХ БУМАЖНЫХ ВАЛОВ СУПЕРКАЛАНДРА (НБВС) РЕЗЦАМИ С ОБНОВЛЯЮЩЕЙСЯ РЕЖУЩЕЙ КРОМКОЙ

Рассмотрено влияние скорости обновления режущей кромки чашечных резцов на динамику процесса обработки НБВС. Приведены уравнения регрессии для определения составляющих силы резания в зависимости от технологических параметров, произведена оптимизация динамики процесса обработки.

В настоящее время в машиностроении уделяется особое внимание вопросам повышения эффективности производства, производительности труда, надежности, долговечности, качества выпускаемых изделий, их конкурентоспособности и поэтому основной задачей технологии машиностроения является интенсификация процесса обработки.

Из известных способов обработки поверхностей вращения наиболее эффективное и комплексное решение проблемы достигается при использовании ротационного резания.

В бумажной промышленности для обеспечения высокой гладкости массовых видов бумаги (писчей, типографской, книжно-журнальной, офсетной, мелованной, для глубокой печати, иллюстрационной), а также некоторых немассовых (технической, конденсаторной, пергаментной, чертежной, прозрачной, диаграммной, сигаретной, папиросной, некоторых видов картона) вводится отделочная операция каландрирования на суперкаландре [1].

Упругие свойства набивки и состояние поверхностного слоя НБВС являются основными факторами, формирующими качественные показатели выпускаемой бумаги. Вследствие сжатия в захвате металлическим валом они способствуют возникновению площадки (зоны) деформации в набивном вале. Под действием усилия сжатия металлическим валом НБВС деформируется, приобретая выпуклость. Благодаря этому окружная скорость на периферии НБВС больше окружной скорости металлического вала. Разность скоростей набивного и металлического валов создает момент микроскольжения металлического вала по поверхности каландрируемой бумаги, придавая ей гладкость и лоск.

Ввиду особой роли НБВС, к ним предъявляют повышенные требования по точности размеров, формы, взаимного расположения поверхностей и величине шероховатости на рабочей поверхности.

Ввиду высокой абразивной способности обрабатываемого материала и большой протяженности поверхности обработки, а также исходя из требований, предъявляемых к готовым валам, инструмент, используемый для их обработки, должен обладать высокой размерной стойкостью. Поэтому на целлюлозно-бумажных комбинатах используют либо алмазное точение, либо точение твердосплавными резцами с последующим шлифованием абразивными кругами.

Качество бумаги после каландрирования в значительной степени зависит не только от качества набивки, но и от качества механической обработки НБВС. На большей части предприятий отрасли независимо от вида набивного материала и назначения вала механическую обработку НБВС осуществляют по двухоперационной технологии [1].

Электронная библиотека Белорусско-Российского университета

Первоначально, после установки и выверки на токарном станке, производится проточка выступающей над запорной шайбой набивки, а затем проходным резцом протачивают поверхность шайбы и набивку до расчетного диаметра с учетом припуска 1…1,5 мм на чистовую обработку. В качестве чистовой обработки применяют либо токарную алмазными резцами марки АСПК-2 и АСПК-3 с массой кристалла не менее 0,9 карата, либо шлифование абразивными кругами [1].

Алмазная обработка НБВС обеспечивает необходимую точность и стабильность размеров благодаря высокой стойкости режущего элемента, которая выше стойкости твердосплавных резцов в 70…100 раз. При этом обеспечивается шероховатость обработанной поверхности по параметру Ra = 1,6 мкм при подаче не более 0,1 мм/об [1].

Шлифование НБВС, набранных из хлопкошерстяной, асбестолатексной бумаги и из натурального хлопка, следует производить только сухим способом. Применение воды и различных эмульсий недопустимо, так как приводит к преждевременному выходу валов из строя, ухудшению эксплуатационных свойств, повышению шероховатости обработанной поверхности вала. При увлажнении набивки вала из хлопкошерстяной или асбестолатексной бумаги межволоконные связи ослабевают, в результате чего абразивные зерна шлифовального круга не подрезают, а выдергивают волокна бумаги, и поверхность НБВС приобретает значительную ворсистость. Кроме того, в период шлифования влага проникает на всю глубину набивки вала, вплоть до поверхности сердечника, что создает дополнительные трудности при эксплуатации такого вала. В результате неравномерного набухания набивки, особенно вблизи торцовых шайб, возникает в набивке избыточное давление, вследствие чего происходит местный перегрев поверхности вала, что приводит к местным прижогам и прогарам набивки. В результате шлифования, которое занимает по времени не менее 32 часов непрерывной работы оборудования, шероховатость обработанной поверхности по параметру Ra обеспечивается не ниже 2,1…2,5 мкм [1].

На финских бумажных заводах, в частности, «Темпелла», «Валмет», «Вяртсиля» применяют трехоперационную технологию обработки НБВС. На черновой операции обработка производится резцами, оснащенными твердосплавной пластинкой при скорости резания 3…4 м/с, глубине резания 0,5…5 мм и подаче 0,6…0,8 мм/об, время рабочего хода такой обработки 125 мин при ширине формата 8600 мм. На чистовой операции обработка производится резцом, оснащенным синтетическим алмазом с радиусом 2…5 мм при скорости резания 5 м/с, глубине резания 0,2…0,3 мм и подаче 0,2…0,3 мм/об, время рабочего хода 209 мин. Финишная операция заключается в шлифовании вала при помощи радиусного деревянного башмака, обернутого сукном и шлифовальной бумагой № 2 или № 3. Шлифование производится в направлении, противоположном алмазному точению в три или четыре рабочих хода, при этом направление вращения каждый раз изменяется на противоположное при скорости резания 5…6 м/с. Назначение шлифования — удаление волокон, уменьшение остаточной ворсистости и выравнивание следа, оставленного резцом после алмазного точения [2].

Но ни алмазное точение, ни шлифование не обеспечивают необходимой шероховатости рабочей поверхности НБВС. Поэтому все недоработки и упущения механической обработки выправляются прикаткой НБВС непосредственно на суперкаландре без бумаги. Вновь изготовленные валы подвергаются прикатке в течение 72...100 часов непрерывной работы. Валы, бывшие в эксплуатации на суперкаландре после по-

Электронная библиотека Белорусско-Российского университета

вторной механической обработки, в зависимости от срока использования на суперкаландре, прикатываются в течение 6…12 и более часов.

На Знаменской бумажной фабрике ПО «Калининградбумпром» внедрена механическая обработка НБВС ротационным резцом, который разработан сотрудником кафедры «Технология машиностроения» Калининградского технического института рыбной промышленности (ныне Государственный технический университет) Л. А. Гиком и академиком АН БССР Е. Г. Коноваловым [1]. При значительных преимуществах данного инструмента, позволяющего использовать твердосплавные режущие элементы вместо алмазных резцов, он обладает рядом существенных недостатков. Резец при настройке требует установки под двумя углами в горизонтальной и вертикальной плоскостях, а также по высоте. Вследствие большого соотношения диаметров режущего элемента и обрабатываемой заготовки частота вращения режущего элемента превышает 3000 мин$^{-1}$, что, в свою очередь, снижает долговечность шпиндельного узла ротационного резца. При этом точность изготовления деталей и сборки ротационного резца должна быть такой, чтобы торцовое биение режущего элемента в процессе обработки не превышало 0,005 мм. Учитывая то обстоятельство, что набивка НБВС обладает плохой проводимостью тепла, большая часть тепловой энергии, выделяемой в процессе резания, устремляется в резец, тем самым ухудшая условия работы шпиндельного узла резца. Ввиду того, что режущий элемент находится в процессе обработки в непрерывном вращении и каждая точка режущей кромки резца многократно вступает во взаимодействие с обрабатываемой заготовкой, ее состояние в начале и конце рабочего хода изменяется в зависимости от износа рабочих поверхностей, тем самым нарушается размер статической настройки технологической системы.

Нами предложено использование принудительного привода для постоянного обновления режущей кромки, что дает возможность применения более жестких подшипников скольжения в качестве опор для шпиндельного узла резца. При этом наличие отдельного привода позволяет производить обработку с кинематическим коэффициентом отличным от свободновращающегося резца и осуществлять процесс резания как косоугольное. Отсутствие постоянного вращения режущего элемента с большой частотой, позволяет управлять точностью обработки посредством изменения скорости обновления режущей кромки в процессе резания. Применение одноповоротной прямой второй геометрической схемы ротационного резания для обработки НБВС позволяет значительно упростить процесс настройки и установки резца относительно обрабатываемой заготовки. Исходя из вышесказанного, применение для обработки НБВС резцов с принудительным обновлением режущей кромки позволяет объединить преимущества ротационного и алмазного резания, избежав при этом существенных недостатков, присущих этим процессам.

Исследования динамики процесса обработки НБВС чашечными резцами с принудительным обновлением режущей кромки показали (рис. 1), что с ростом скорости обновления режущей кромки происходит пропорциональное уменьшение всех составляющих силы резания.

Это вызвано тем, что в зоне резания участвует менее изношенная часть режущего клина резца. При обработке с относительно небольшими скоростями обновления режущей кромки менее чем $Vp = 4 \cdot 10^{-6}$ м/с происходит значительный износ режущего элемента с образованием фаски износа, изменяющей геометрию передней поверхности режущего элемента, что приводит к изменению механики отделения припуска и в результате к увеличению всех состав-

Электронная библиотека Белорусско-Российского университета

ляющих силы резания. При этом следует отметить, что благодаря изменению конфигурации режущего клина процесс резания становится неустойчивым и направление результирующего вектора силы резания изменяет свое направление по отношению к первоначальной геометрии. Увеличение скорости обновления режущей кромки более чем Vp = $5 \cdot 10^{-5}$ м/с нежелательно, так как время полного оборота режущего элемента становится меньше времени рабочего хода.

Так как исследуемый процесс предназначен для чистовой, финишной обработки набивных НБВС, то скорость обновления режущей кромки должна быть такой, чтобы время рабочего хода было немного меньше, чем время полного оборота режущего элемента резца. Все это необходимо для того, чтобы на всей протяженности обрабатываемой поверхности обработка велась с неизменной геометрией режущего клина и как результат появляется возможность поддержания стабильными величины составляющих силы резания во время рабочего хода.

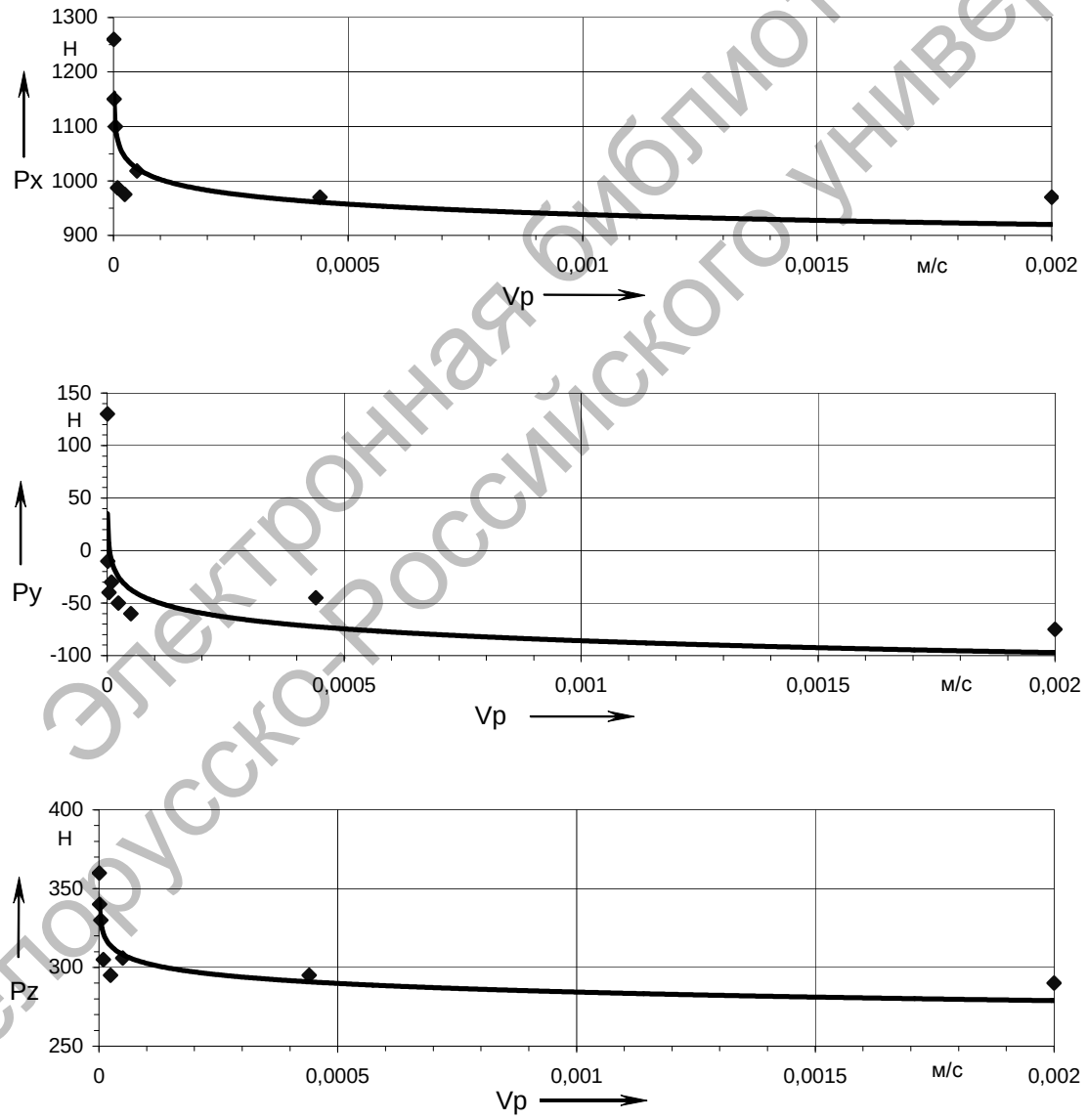

Рис. 1. Влияние скорости обновления режущей кромки на составляющие силы резания: V = 10,8 м/с; t = 1,0 мм; S = 2,0 мм/об; H = 10 мм; φ_y = 3°10'; γ_3 = 15°; α_3 = 12°; $d_ч$ = 60 мм

Электронная библиотека Белорусско-Российского университета

Для более глубокого изучения процесса и ранжирования факторов, оказывающих влияние на динамику процесса обработки НБВС чашечными резцами с принудительным обновлением режущей кромки, при проведении экспериментов использовалась многофакторная схема в виде симметричного ротатабельного композиционного униформплана второго порядка [3], план которого представлен в табл. 1, имеющая преимущества перед однофакторным экспериментом, так как дает более точные результаты.

Табл. 1. Симметричный композиционный униформплан второго порядка

Номер опыта	x_1	x_2	x_3	x_4	Px, H	Py, H	Pz, H
1	2	3	4	5	6	7	8
1	1	1	1	1	1470	-180	510
2	-1	1	1	1	1520	-220	540
3	1	-1	1	1	1070	-160	315
4	-1	-1	1	1	1120	-180	350
5	1	1	-1	1	870	-140	300
6	-1	1	-1	1	920	-190	320
7	1	-1	-1	1	470	-80	90
8	-1	-1	-1	1	520	-120	110
9	1	1	1	-1	1650	-140	620
10	-1	1	1	-1	1700	-185	640
11	1	-1	1	-1	1250	-90	410
12	-1	-1	1	-1	1300	-90	435
13	1	1	-1	-1	1050	5	360
14	-1	1	-1	-1	1100	-40	390
15	1	-1	-1	-1	650	90	160
16	-1	-1	-1	-1	700	110	190
17	-2	0	0	0	1300	-10	470
18	2	0	0	0	1200	10	410
19	0	-2	0	0	550	-100	70
20	0	2	0	0	1300	-250	470
21	0	0	-2	0	350	-40	150
22	0	0	2	0	1650	-275	550
23	0	0	0	-2	1300	55	400
24	0	0	0	2	880	-190	250
25	0	0	0	0	950	-60	285
26	0	0	0	0	940	-60	282
27	0	0	0	0	950	-55	285
28	0	0	0	0	1050	-50	315

Электронная библиотека Белорусско-Российского университета

Окончание табл. 1

1	2	3	4	5	6	7	8
29	0	0	0	0	1060	-58	318
30	0	0	0	0	1040	-48	312
31	0	0	0	0	1050	-48	315

Кроме того, планирование и обработка результатов многофакторного эксперимента в настоящее время формализованы, поэтому адекватность математической модели оценивается на основе критериев многомерной математической статистики.

Кроме варьируемых факторов (табл. 2) все остальные поддерживались на постоянном уровне. В частности, параметры установки инструмента относительно заготовки $\varphi_y = 3^{\circ}10'$ и H = 10 мм, углы заточки $\gamma_3 = 15°$, $\alpha_3 = 12°$, режущий элемент был изготовлен из твердого сплава Т15К6, а диаметр режущей кромки $d_ч = 60$ мм; в качестве заготовки использовался стандартный НБВС с диаметром 350…220 мм и длиной обработки 650 мм. Обработка производилась на токарно-винторезном станке мод. 163.

Табл. 2.Уровни варьирования факторов

Фактор	Уровень варьирования факторов			
	Скорость резания, м/с	Подача, мм/об	Глубина резания, мм	Скорость обновления режущей кромки, м/с
Код	x_1	x_2	x_3	x_4
Основной уровень x_{i0}	10	2,032	1	0,000012
Интервал варьирования l_i	4	0,984	0,4	0,000005
Верхний уровень $x_i = +1$	14	3,016	1,4	0,000017
Нижний уровень $x_i = -1$	6	1,048	0,6	0,000007
Звездная точка $x_i = +2$	18	4	1,8	0,000022
Звездная точка $x_i = -2$	2	0,064	0,2	0,000002
Формулы перевода	$x_1 = X_1 - x_{10} / l_1$	$x_2 = X_2 - x_{20} / l_2$	$x_3 = X_3 - x_{30} / l_3$	$x_4 = X_4 - x_{40} / l_4$

Значимость коэффициентов моделей (табл. 3) проверяли по t-критерию Стьюдента величина которого при 5-процентном уровне значимости для избранного плана равна t = 2,45.

По результатам опытов и расчетов коэффициентов получены уравнения регрессии для составляющих силы резания P_x, P_y, P_z вида:

$$y = b_0 + \sum_{1 \le i \le k} b_i x_i + \sum_{1 \le i \le j \le k} bij x_i x_j + \sum_{1 \le i \le k} b_{ii} xi^2 .$$

Проверка адекватности моделей проводилась по расчетному критерию Фишера, сравнивая его с табличным для 5-процентного уровня значимости (табл. 4).

Электронная библиотека Белорусско-Российского университета

Для поиска оптимальных решений по указанным моделям в изученной области факторного пространства, представляющей собой в общем случае гиперкуб $|xi| \le 1$, проведем по методу, который заключается в преобразовании модели с k-факторами в модель для одного-двух факторов. Для этого производим стабилизацию остальных на оптимальных для изученной области уровнях.

Экстремум по i-ой переменной для однофакторной модели определяется выражением

$$x_{i\,ext} = -\frac{bi}{2b_{ii}} \ . \qquad (1)$$

Табл. 3. Коэффициенты моделей

Обозначение коэффициентов	Коэффициент, расчетный для P_z	Значимый коэффициент для P_z	Коэффициент расчетный для P_y	Значимый коэффициент для P_y	Коэффициент расчетный для P_x	Значимый коэффициент для P_x	Критерий Стьюдента в центре плана
B0	301,9967	301,9967	-54,22	-54,22	1006,582	1006,582	2,45
B1	-13,7511	-13,7511	10,8342	10,8342	-25,002	0	2,45
B2	100,8414	100,8414	-36,2529	-36,2529	195,849	195,849	2,45
B3	112,509	112,509	-56,2545	-56,2545	308,358	308,358	2,45
B4	-40,4199	-40,4199	-59,1714	-59,1714	-95,0076	-95,0076	2,45
B12	0,625	0	8,75	8,75	0	0	2,45
B13	-0,625	0	-0,625	0	0	0	2,45
B14	0	0	5	5	0	0	2,45
B23	-1,25	0	10	10	0	0	2,45
B24	-0,625	0	11,875	11,875	0	0	2,45
B34	-41,25	-41,25	32,5	32,5	-75	-75	2,45
B11	36,69218	36,69218	13,42189	13,42189	64,3129	64,3129	2,45
B22	-5,80782	-5,80782	-30,3281	-30,3281	-16,9371	-16,9371	2,45
B33	14,19218	14,19218	-25,9531	-25,9531	1,8129	1,8129	2,45
B44	7,94218	7,94218	-3,45311	-3,45311	24,3129	24,3129	2,45

Табл. 4. Проверка адекватности моделей

Параметры для оценки адекватности	Модель P_x	Модель P_y	Модель P_z
Дисперсия в центре плана	3195,833	30,58796	287,625
Число (знаменатель)степеней свободы в центре плана	6	6	6
Дисперсия неадекватности	4652,837	89,49878	1102,417
Число (числитель) степеней свободы по сетке	21	16	20
Расчетный критерий Фишера	1,455907	2,925948	3,832826
Табличный критерий Фишера для 5-процентного уровня значимости	3,87	3,92	3,87

Электронная библиотека Белорусско-Российского университета

Экстремум по i-ой переменной многофакторной модели определяется выражением

$$x_{iext} = -\frac{b_i + \sum_{i \prec j} b_{ij} x_j}{2b_{ii}}, \qquad (2)$$

т.е. зависит от эффектов взаимодействия i-фактора с остальными. Для того чтобы x_{iext} всегда находился в зоне эксперимента, необходимо выполнение условия

$$|b_i| + \sum_{i \prec j} |b_{ij}| \le 2|b_{ii}|.$$

Если же данное условие не выполняется, а имеет место

$$|b_i| + \sum_{i \prec j} |b_{ij}| > 2|b_{ii}|,$$

то x_{iext} либо находится вне зоны эксперимента, либо проходит через ее границы $|xi| = 1$.

Оптимизацию динамики процесса обработки бумажных валов резцами с обновляющейся режущей кромкой по квадратичным моделям проведем по отысканию минимума. Поэтому для всех x_i , для которых $b_{ii} \le 0$, выполняется условие

$$|b_i| \ge \sum |b_{ij}|,$$

и для всех x_i, для которых $b_{ii} > 0$, выполняется условие

$$|b_i| - \sum |b_{ij}| \ge 2|b_{ii}|$$

вводим в модель $x_i = |1|$. Знак подстановки обратный и строим новые модели.

Выполнение вышеописанных действий проводим до тех пор, пока указанные условия не перестанут выполняться. После подстановок и упрощений уравнения имеют вид:

$$P_x = 487{,}249 - 20{,}008x_4 + 64{,}313x_1^2 + 24{,}313x_4^2;$$

$$P_y = -211{,}258 + 24{,}584x_1 + 13{,}422x_1^2;$$

$$P_z = 97{,}031 - 13{,}751x_1 + 0{,}83x_4 + 36{,}692x_1^2 + 7{,}942x_4^2.$$

Поскольку полученные модели либо однофакторные, либо двухфакторные, но не содержащие парных взаимодействий, теперь можно для всех x_i , для которых $b_{ii} > 0$, выполнить условие

$$|b_i| + \sum |b_{ij}| \le 2|b_{ii}|,$$

рассчитать положение экстремумов по формулам (1), (2). Так, составляющая P_x имеет два экстремума по фактору $x_1 = 0$ и $x_4 = +0{,}411$, где x_1 – скорость резания и x_4 – скорость обновления режущей кромки. Для составляющей P_y приведенная модель однофакторная; положение экстремума рассчитано по формуле (1), что соответствует точке $x_1 = -0{,}916$. У модели для составляющей P_z также имеется два экстремума с координатами $x_1 = +0{,}187$ и $x_4 = -0{,}05$. При этом следует отметить, что все выявленные экстремумы находятся в области исследуемого факторного пространства, что свидетельствует об оптимальном выборе диапазона варьирования факторов. Разброс местоположения экстремумов для составляющих силы резания свидетельствует о степени влияния скорости резания на каждую составляющую силы резания в отдельности при неизменности характера воздействия.

Таким образом, полученные математические модели позволяют прогнозировать величину силы резания при обработке НБВС чашечными резцами с принудительным обновлением режущей кромки в зависимости от режимов резания и скорости обновления режущей кромки. Это, в свою очередь, позволит управлять точностью обработанной поверхности в зависимости от жесткости технологической системы и осуществлять подбор режимов резания и скорости обновления режущей кромки на величину которых влияет состояние оборудования, опор качения и жесткость самого вала.

Электронная библиотека Белорусско-Российского университета

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Зайцев, И. М.** Эксплуатация и ремонт суперкаландров / И. М. Зайцев. – М. : Лесная пром-сть, 1981.

2. **Milukov, O.** Prés de 50 licences soviétigues ont été vendues en Finlqnde / O. Milukov // Licensiontorg. – 1988. – № 24. – С. 8-10.

3. **Новик, Ф. С.** Оптимизация процессов технологии металлов методами планирования экспериментов / Ф. С. Новик, Я. Б. Арсов. – М. : Машиностроение; София : Техника, 1980.

Белорусско-Российский университет
Материал поступил 19.04.2006

A. A. Zholobov, V. A. Logvin
Features of processing of filled paper rolls of supercalender (FPRS) by cutting tools with the updated cuttingedge
Belarusian-Russian University

In article have considered effect of speed of updating of cutting edge of cup-tip tools on dynamics of process of processing FPRS. Have offered equations of regression for definition of components of force of cutting depending on technological parameters, have made optimization of dynamics of process of processing.

УДК 621.833:620.191

Р. М. Игнатищев, д-р техн. наук, проф., Ю. В. Машин, П. В. Другаченко

ОСНОВЫ НОВЫХ ПУТЕЙ УПРЕЖДЕНИЯ ПИТТИНГА В ЗУБЧАТЫХ ПЕРЕДАЧАХ

В статье изложены результаты исследований питтинга в зубчатых передачах, учитывающие явление повышения контактного напряжения в околополюсных зонах.

Введение

Основной причиной низкой долговечности эвольвентных зубчатых передач закрытого типа является контактное выкрашивание зубьев (питтинг).

Существуют следующие нормативные документы: ГОСТ 21354-87 «Передачи зубчатые цилиндрические эвольвентные внешнего зацепления. Расчет зубьев на контактную прочность»; DIN 3990-2 «Колеса зубчатые цилиндрические. Расчет несущей способности по питтингу (язвенной коррозии)»; ISO 6336-2 «Расчет допустимой нагрузки прямозубых и косозубых цилиндрических зубчатых передач. Расчет критической выносливости поверхности (выкрашивания)»; учебная литература уже более 45 лет также учит будущих инженеров упреждению питтинга в зубчатых передачах: «Расчет зубьев цилиндрических колес на контактную прочность» [1], «Расчет зубьев по контактным напряжениям» [2], «Расчет на контактную прочность активных поверхностей зубьев» [3], «Расчет зубьев цилиндрических передач на контактную прочность» [4] и др.

Проведенные нами в 2003-2005 гг. эксплуатационные обследования зубчатых передач показали, что проблему возникающего в них питтинга (на поверхностях зубьев в местах перехода ножек в головки) пока, несмотря на большие прилагавшиеся усилия, решить не удалось [5]. Это обусловлено отсутствием учета явления повышения (в указанных зонах) контактных напряжений. Данное явление было обнаружено Р. М. Игнатищевым [6]. К настоящему времени исследования существенно расширены. Авторы считают целесообразным изложить их и указать пути решения проблемы питтинга, воз-

Электронная библиотека Белорусско-Российского университета