

УДК 676:621.9.042

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

ОСОБЕННОСТИ МОДЕЛИРОВАНИЯ НБВС ДЛЯ ОБЕСПЕЧЕНИЯ ТОЧНОСТИ ПРИ ОБРАБОТКЕ ЧАШЕЧНЫМИ РЕЗЦАМИ С НЕПРЕРЫВНО ОБНОВЛЯЮЩЕЙСЯ РЕЖУЩЕЙ КРОМКОЙ

В статье предложен порядок построения модели НБВС, позволяющей определить величину и расположение сечения с максимальным статическим прогибом при обработке чашечными резцами с непрерывно обновляющейся кромкой. Проанализировано влияние величины прогиба вала на точность и виброустойчивость обработки НБВС. Приведены результаты расчетов величин прогиба вала от действия массы и усилия резания, определены собственные частоты и формы колебаний для обеспечения виброустойчивости и достижения заданной точности при обработке.

В целлюлозно-бумажной промышленности при производстве бумаги с высокими печатными свойствами применяют различные отделочные операции, в частности, каландрирование на суперкаландре. Данный процесс позволяет повысить удельную массу бумаги, плотность, лоск, прозрачность, усилие на разрыв, выровнять толщину бумажного полотна, уменьшить шероховатость (гладкость) [1, 2].

Увлажненная бумага в суперкаландре подвергается действию давления и трения между металлическими и упругими набивными бумажными валами суперкаландров (НБВС). Конструктивно НБВС представляет собой стальной сердечник, на котором под определенным давлением спрессована набивка. Набивка на сердечнике запирается торцевыми шайбами и специальной арматурой. Наружный диаметр НБВС зависит от ширины формата суперкаландра и составляет 340...760 мм с диаметром сердечника в пределах 180...470 мм. Длина набивной части вала должна быть на 100...150 мм больше обрезной ширины каландрируемой бумаги. Суперкаландры с рабочей шириной менее 4250 мм имеют запорные устройства, представляющие собой кольца с разъемными сегментами, а широкоформатные суперкаландры с рабочей шириной 4250...8620 мм – запорные гайки с конической опорной поверхностью, на ко-

торую базируются торцевые шайбы. Сердечники, как и запорную арматуру НБВС, изготавливают из стали 45, 40Х или 45Х.

НБВС набираются на гидравлических прессах, обеспечивающих давление в набивке от 9 до 45 МПа и более, по определенной технологии набивки и обрабатываются на токарных и шлифовальных станках. Величина усилия, с которым набирается НБВС, выбирается в зависимости от назначения вала и необходимой плотности и твердости. После механической обработки валы проходят операцию обкатки на суперкаландре без бумаги по определенному режиму для снижения шероховатости рабочей поверхности и повышения поверхностной твердости. НБВС, особенно вновь изготовленные, после первой механической обработки еще не обладают достаточной твердостью поверхности, поэтому очень чувствительны к механическим воздействиям вследствие попадания между валами разного рода пыли, бумажных и других посторонних включений. Поэтому обкатка должна производиться по чистым отполированным поверхностям металлических валов, по всей длине бочки вала при равномерном линейном давлении между валами и равномерной их температуре, не превышающей 50...60 °С. Поскольку контролировать непосредственно давление на поверхности НБВС невозмож-

но, то контроль осуществляется по усилию прижима металлических валов к НБВС, отнесенному к рабочей длине валов суперкаландра. Это связано с тем, что с ростом усилия прижима увеличивается площадь площадки контакта НБВС и металлического вала и соответственно удельное давление уменьшается (рис. 1). Нормальная твердость НБВС после механической обработки для каландрирования писчей бумаги и бумаги для печати достигает 36...40 ед. по шкале С склероскопа Шора. При этом валы должны выдерживать линейное давление при каландрировании не менее 100...250 кН/м, а на современных суперкаландрах – до 350 кН/м. Для отделки технической бумаги используют НБВС из асбестовой бумаги, содержащей до 25...50 % хлопковой полумассы

с латексной или крахмальной проклейкой. Твердость набивки таких валов достигает 42...46 ед. Новые валы, установленные на суперкаландр после шлифования, подвергают длительной обкатке в течение 6...12 ч вхолостую, обмывая их через каждые 15...30 мин теплой водой, доводя тем самым поверхностную твердость вала до 50...52 ед. Новые валы обкатывают дольше, чем валы, подверженные повторной механической обработке. Готовые НБВС должны отвечать жестким техническим требованиям. Овальность бочки вала должна быть не более 0,02 мм, отклонение профиля продольного сечения бочки вала (конусность, бочкообразность, изогнутость) – не более 0,02 мм по всей рабочей поверхности, а шероховатость – не более 0,8...1,6 мкм по параметру Ra [1, 2].

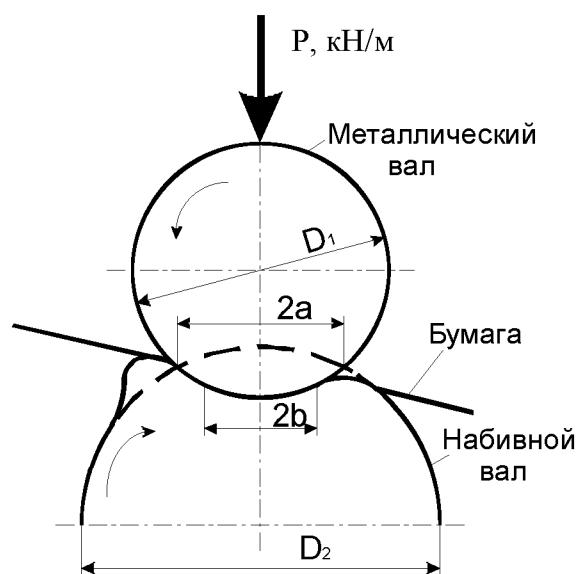


Рис. 1. Графическое отображение образования площадки деформации набивного бумажного вала на суперкаландре: $2a$ – геометрическое перекрытие одного вала другим, мм; a – геометрическая деформация НБВС, мм; $2b$ – ширина зоны давления, мм, при действии равномерно распределенного по ширине усилия P , кН/м

Трение бумаги о поверхность валов в процессе каландрирования происходит главным образом из-за радиальной деформации НБВС, в которые вдавливаются более твердые металлические валы. Благодаря этому окружные скорости НБВС и металлических валов раз-

ные, и бумага испытывает значительное трение в зоне прессования, что приводит к росту температуры до 63...68 °С [1, 2]. Увеличение температуры валов выше 70 °С приводит к ухудшению качества выпускаемой бумаги и возможности обрыва полотна в процессе ка-

ландрирования, особенно при недостаточном количестве влаги в бумаге. Наибольшее влияние на величину проскальзывания валов суперкаландров оказывают давление, скорость и упругие свойства НБВС [1]. На рис. 1 видно, что с повышением усилия воздействия металлического вала на поверхности НБВС увеличивается площадка деформации, в результате чего возрастает длительность пребывания бумаги под воздействием микроскольжения металлического вала по НБВС [2].

НБВС в силу своих конструктивных особенностей отличаются низкой жесткостью и соответственно низкими силами упругого сопротивления. Поэтому упругая система НБВС легко приходит в колебательное движение при выводе каким-либо путем из равновесия. Колебания происходят около положения упругого равновесия, при котором в нагруженной системе имеют место статические деформации и соответствующие им статические напряжения. При колебаниях к статическим деформациям добавляются динамические, зависящие от вида колебательного движения и амплитуды [3].

В связи с вышеизложенным обеспечение технических требований, предъявляемых к НБВС в результате механической обработки, является сложнейшей задачей. Ввиду низкой жесткости НБВС обработка данных изделий возможна с частотами вращения, значительно отличающимися от собственной частоты во избежание появления резонанса. При этом следует учитывать наличие прогиба у НБВС при установке на станке в статическом состоянии как фактора, снижающего устойчивость. Как показала практика эксплуатации и наши измерения, величина прогиба составляет от 1,5 – при формате 4410 мм до 4 мм – при формате 8620 мм. Наличие постоянно действующего растягивающего усилия от давления набивочного материала на запорную арматуру поддерживает стальной сердечник

НБВС в напряженном растянутом состоянии. Действие постоянных растягивающих напряжений в сердечнике НБВС при приложении крутящего момента способствует незначительному уменьшению прогиба во время вращения. Но, тем не менее, уменьшить прогиб НБВС при вращении до нуля не удастся и обработку приходится производить с динамическим прогибом в вертикальной плоскости, отличным от статического. Также сила резания, прикладываемая к НБВС при обработке, стремится отклонить его от состояния равновесия. Если силы инерции и растягивающие усилие в сердечнике, стремящиеся уменьшить прогиб НБВС, приближая положение оси вала к оси центров станка при вращении, будут превышены составляющими усилия резания по одной из осей, произойдет смещение центра масс НБВС и виброустойчивость снизится. Все эти факторы в значительной мере определяют стабильность состояния НБВС при обработке. Поэтому нами принято решение по разработке математической модели НБВС, позволяющей определять величину статического прогиба, критические собственные частоты, соответствующие им формы колебаний в зависимости от конструктивных параметров вала, а также выявить влияние составляющих усилия резания на перемещение НБВС.

Применительно к расчету виброустойчивости системы НБВС нами использован программный продукт, построенный по модульному принципу как автономная система анализа МКЭ. Она включает модули для решения линейных и нелинейных, статических и динамических задач анализа механических конструкций, а также анализ собственных частот и форм колебаний [4–7].

Построение компьютерной конечно-элементной модели НБВС производилось вводом данных геометрии деталей, заданием физико-механических свойств материалов деталей НБВС, гра-

ничных условий, разбиением конструкции НБВС на конечные элементы для решения статической и частотной задач. На рис. 2 представлена компьютерная схема НБВС диаметром 720 мм формата 8620 мм с граничными условиями,

внешними нагрузками и видом сетки конечных элементов на твердом теле. Модель построена из твердых тетраэдральных 4-узловых конечных элементов. Густота сетки разбиения равномерная по сечению.

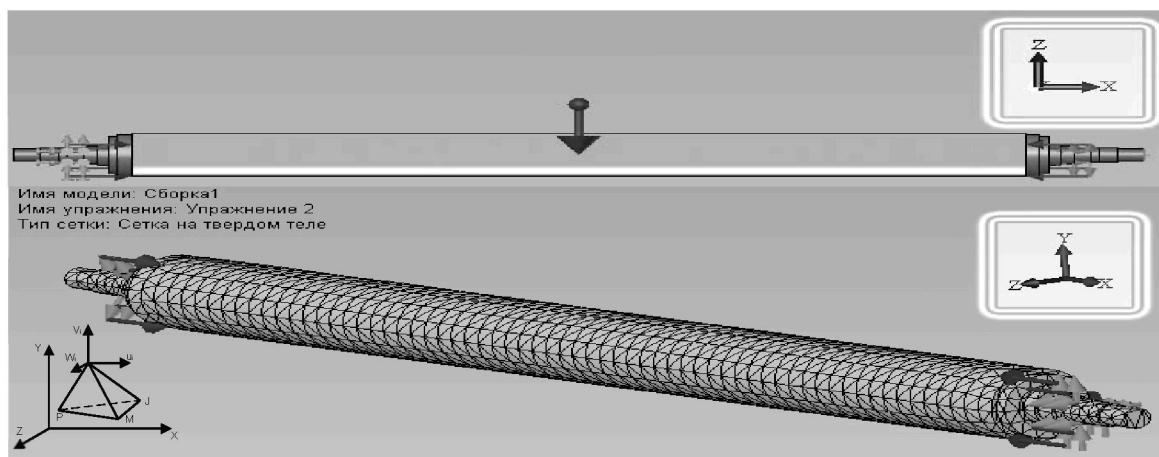


Рис. 2. Компьютерная схема НБВС

Адекватность модели для статического расчета НБВС оценивали, сопоставляя с результатами экспериментальных исследований, проводимых на Светогорском ЦБК, расположенном в Ленинградской области, целью которых было измерение прогиба обрабатываемого вала в статическом состоянии. Прогиб НБВС с рабочим диаметром набивки 720 мм и шириной формата 8620 мм равнялся 3,1 мм. В результате проведенных расчетов конечно-элементной модели исследуемого вала результирующее перемещение под действием массы равно 3,45 мм (рис. 3). Результаты статистической обработки данных показали, что погрешность расчетных значений перемещений НБВС при статическом расчете составляет 9,9...11 %. Разработанная модель с достаточной степенью точности позволяет прогнозировать величину статического прогиба НБВС, величина которого затем учитывается при назначении величин установок чашечного резца с непрерывно обновляющейся кромкой относительно

НБВС для получения размера статической настройки технологической системы перед обработкой. Следует отметить, что наличие возможности изменять скорость обновления режущей кромки во время обработки в соответствии с законом изменения величины прогиба НБВС и в соответствии со скоростью формирования площадок износа на рабочих поверхностях режущего клина, а также радиуса перехода между передней и задней поверхностями чашечного резца на протяжении рабочего хода позволяет компенсировать влияние прогиба вала на точность обработки.

На рис. 4 представлены результаты расчетов конечно-элементной модели НБВС по определению величины критических собственных частот и соответствующих им форм колебаний.

Анализируя результаты компьютерных исследований конечно-элементной модели НБВС, установлено, что для исследуемого вала наиболее критическими являются первая и вторая формы колебаний, т. к. обеспечивают наибольший раз-

мах колебаний (см. рис. 4, а, б) при собственной частоте 16,1 Гц, что соответствует колебаниям в горизонтальной (ось Y) и

вертикальной (ось Z) плоскостях, и соответственно наибольшее искривление вала во время обработки.

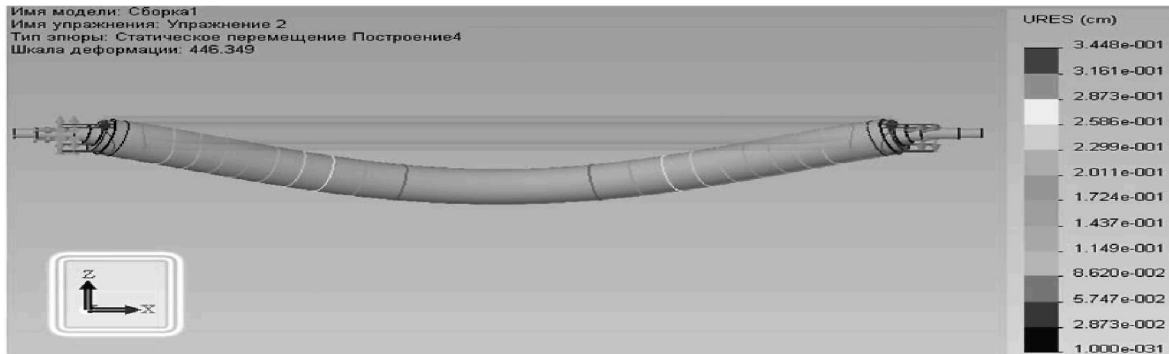


Рис. 3. Изменение величины статического перемещения НБВС в пределах длины обработки

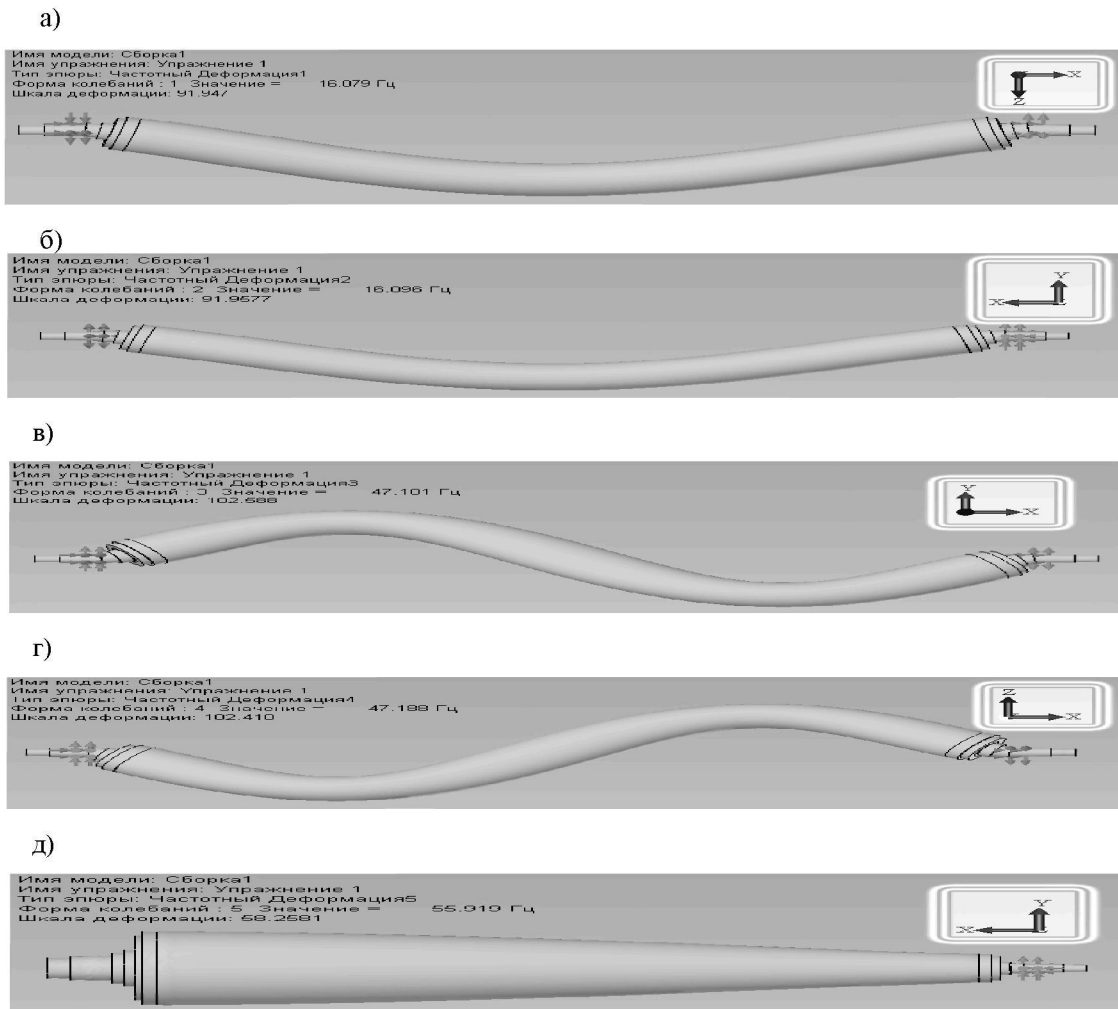


Рис. 4. Формы продольных и поперечных колебаний конечно-элементной модели НБВС формата 8620 мм

Колебания НБВС по эти осям приводят к наибольшим отклонениям диаметральных размеров обрабатываемого вала в продольном сечении при обработке, что может привести к отклонению действительных размеров за пределы поля допуска. Менее критическими являются третья, четвертая и пятая формы колебаний, так как они происходят при собственной частоте 47,1; 47,2 и 55,9 Гц (см. рис. 4, в–д), что соответствует 2830 мин^{-1} и более частоты вращения шпинделя, и обеспечивают наименьший размах колебаний в горизонтальной и вертикальной плоскостях или наименьший прогиб вала при обработке в этих плоскостях. Следует отме-

тить, что обработка НБВС с такими частотами вращения не производится и возникновение таких форм колебаний при обработке НБВС исключено.

На рис. 5 представлены изменения перемещений НБВС в пределах длины обработки при критичной собственной частоте в 16,1 Гц. При этом перемещения в сечении с максимальным статическим прогибом составляют $1,2 \cdot 10^{-2}$ м, что является существенным фактором, влияющим на точность обработки НБВС, если допустить совпадение вынужденной частоты вращения вала с собственной в 16,1 Гц, и даже поставит под угрозу возможность осуществления процесса обработки.

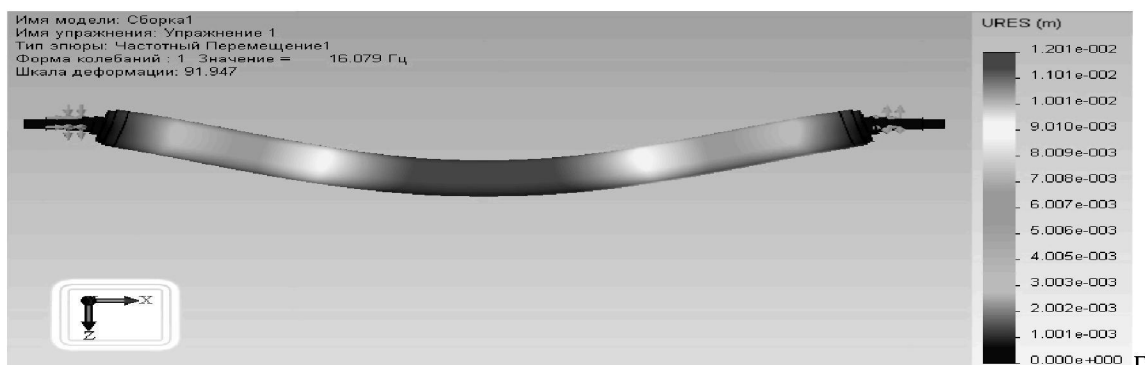


Рис. 5. Результаты расчетов перемещений конечно-элементной модели НБВС формата 8620 мм при критичной частоте 16,1 Гц

На Светогорском ЦБК проведены экспериментальные исследования по определению размаха колебаний НБВС в сечении с наибольшим статическим прогибом. Измерение размаха колебаний в горизонтальной и вертикальной плоскостях осуществлялось при помощи двух индикаторов с ценой деления 0,01 мм, при этом величина его составила в вертикальной плоскости 0,12 мм, а в горизонтальной плоскости – 0,18 мм. При измерении размаха колебаний угловая частота вала составляла 16,7 рад/с, что соответствует 160 мин^{-1} или 2,7 Гц. При этом вынужденная частота вращения НБВС почти в 6 раз отличалась от собственной, что исключает возможность

возникновения резонанса. Компьютерные и экспериментальные исследования подтверждают, что механическая обработка тяжеловесных и длиномерных НБВС сопряжена с определенными трудностями, вызванными отклонением их от положения равновесия на половине длины обработки более чем на 1,2 мм под действием массы при вращении с критической частотой (см. рис. 5).

Для определения степени влияния силы резания на точность обработки и обеспечение виброустойчивости технологической системы при обработке НБВС усилие резания было представлено тремя составляющими в наиболее опасном сечении, где в статике имеется наибольший

прогиб, находящийся, как правило, в области середины рабочего хода.

На рис. 6, а представлены изменения перемещений НБВС по оси X от действия составляющих силы резания; в опасном сечении по середине рабочего

хода перемещение составляет 0,17 мм. На рис. 6, б представлены изменения перемещений НБВС по оси Y от действия составляющих силы резания; в опасном сечении при этом максимальное перемещение составляет 0,065 мм.

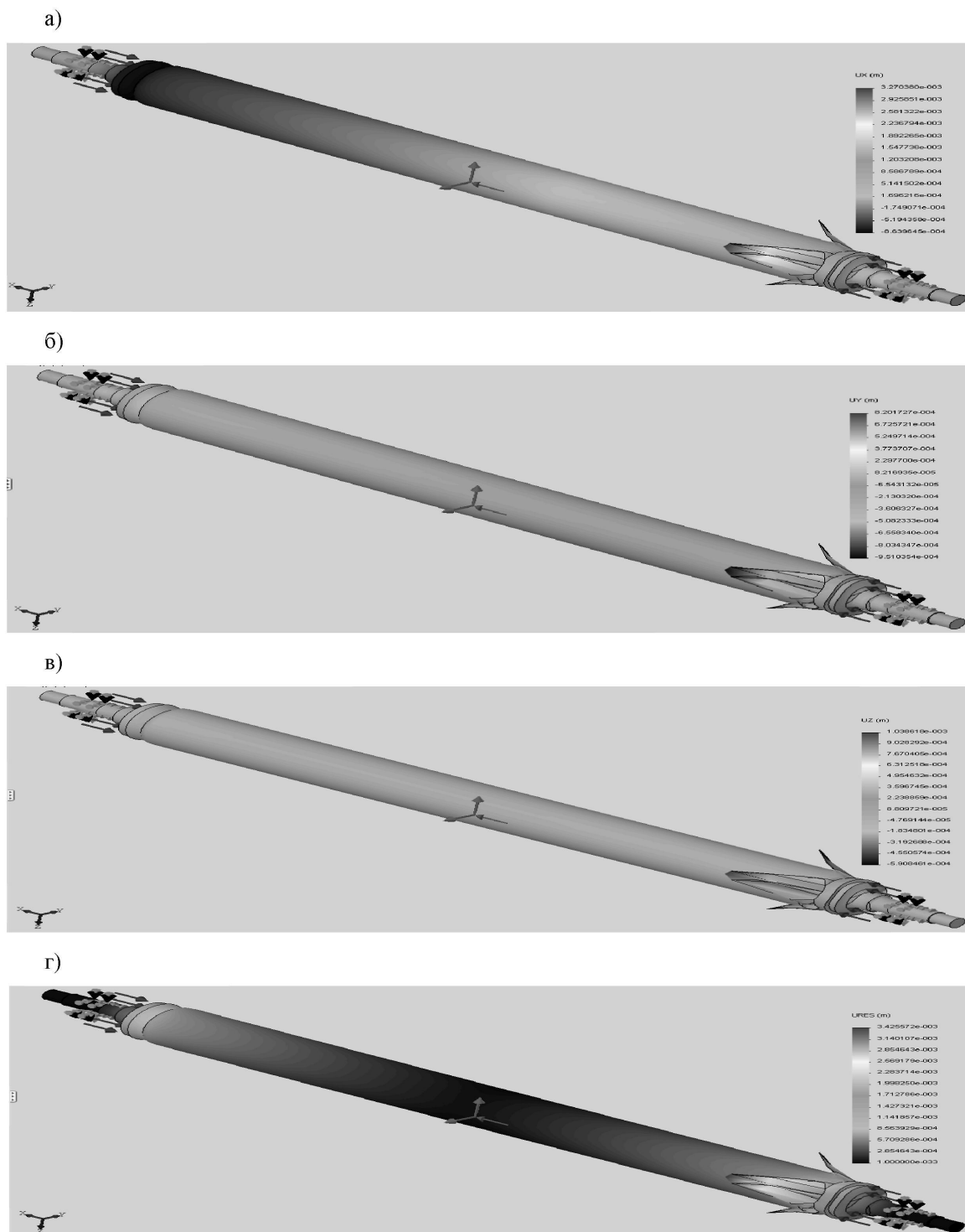


Рис. 6. Результаты изменений перемещений конечно-элементной модели НБВС формата 8620 мм от действия составляющих силы резания

На рис. 6, в представлены изменения перемещений НБВС по оси Z от действия составляющих силы резания; величина максимального перемещения составляет 0,22 мм. На рис. 6, г представлены изменения результирующих перемещений НБВС от действия составляющих силы резания; величина максимального перемещения по середине длины обработки составляет 0,29 мм. Анализируя результаты расчетов от действия составляющих силы резания на перемещение обрабатываемого вала в опасном сечении, находящегося, как правило, в сечении с максимальным статиче-

ским прогибом, можно сделать следующие выводы: действие силы резания существенно влияет на отклонение обрабатываемого вала от положения равновесия, что приводит к искажению формы вала в продольном сечении, и при этом значительно снижается виброустойчивость технологической системы в процессе обработки.

На рис. 7 представлены результаты изменений результирующих перемещений от совместного действия массы вала и результирующей силы резания; максимальное перемещение составляет 1,73 мм.

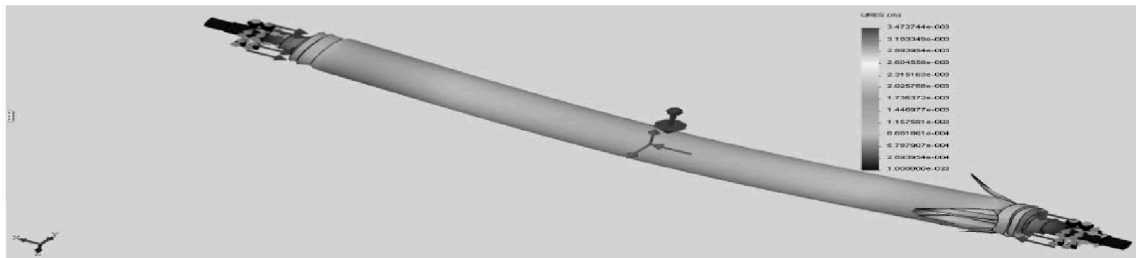


Рис. 7. Результаты изменений результирующих перемещений конечно-элементной модели НБВС формата 8620 мм от совместного действия массы вала и результирующей силы резания

По аналогии с НБВС формата 8620 мм построена конечно-элементная модель вала диаметром 590 мм формата 4410 мм с граничными условиями, внешними нагрузками и равномерным разбиением сетки конечных элементов на твердом теле по сечению.

Адекватность модели расчета прогиба НБВС оценивали, сопоставляя с результатами экспериментальных исследований, проводимых на ООО «ИлимСеверРМП» (г. Коряжма), при которых был измерен прогиб НБВС в статическом состоянии. Прогиб вала с рабочим диаметром набивки 590 мм и шириной формата 4410 мм в результате измерений составил 1,35 мм. В результате проведенных компьютерных исследований конечно-элементной модели результирующее статическое перемещение под действием массы исследуемого вала составило 1,27 мм (рис. 8, а). Результаты

статистической обработки данных показали, что погрешность расчетных значений перемещений НБВС составляет 5,9...6,3 %. Разработанная модель с достаточной степенью точности позволяет прогнозировать величину статического прогиба НБВС, учитываемую при статической настройке технологической системы.

На рис. 8, б представлены изменения перемещений конечно-элементной модели НБВС вдоль длины обработки при критической собственной частоте в 38,7 Гц. На ООО «ИлимСеверРМП» экспериментально определен размах колебаний НБВС в сечении с наибольшим статическим прогибом. Измерение в горизонтальной и вертикальной плоскостях осуществлялось при помощи двух индикаторов с ценой деления 0,01 мм, при этом величина его составила в вертикальной плоскости 0,05 мм, а в гори-

зонтальной плоскости – 0,09 мм. При измерении размаха колебаний угловая частота составляла 16,7 рад/с, что соответствует 2,7 Гц. Обработка НБВС с данной частотой вращения обеспечивает

большую виброустойчивость процесса обработки, чем при обработке вала с форматом 8620 мм, т. к. значительно отличается от собственной частоты вала.

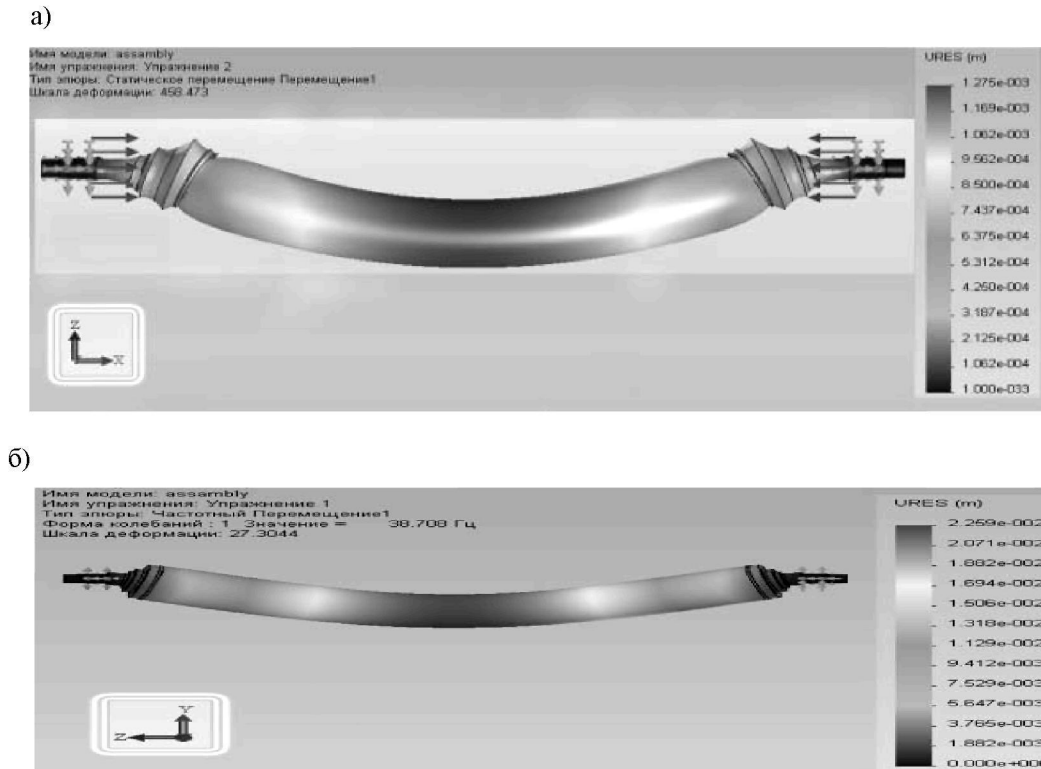


Рис. 8. Результаты изменений перемещений НБВС формата 4410 мм вдоль длины обработки

Оценивая результаты компьютерных исследований конечно-элементной модели НБВС, выявлено, что для исследуемого вала критическими также являются первая и вторая формы колебаний, так как обеспечивают наибольший размах колебаний при собственной частоте 38,7 и 38,8 Гц, что соответствует колебаниям в горизонтальной (ось Y) и вертикальной (ось Z) плоскостях и приводят к максимальным искривлениям вала при обработке. Менее критическими также являются третья, четвертая и пятая формы колебаний, т. к. они происходят при собственной частоте 65,7; 66,4 и 88,1 Гц, что соответствует частоте вращения шпинделя 3941,5 мин⁻¹ и более, и обеспечивают наименьший размах колебаний в горизонтальной и

вертикальной плоскостях и соответственно наименьшие искривления вала в опасном сечении, имеющем максимальный статический и динамический прогибы при обработке.

При обработке размах колебаний возрастает за счет приложения усилия резания, отклоняющего вал от положения равновесия при свободном вращении, особенно при приближении режущего инструмента к сечению с максимальным статическим прогибом в области середины рабочего хода. Если же величина усилия резания превысит величину сил упругого сопротивления вала и отклонит его от положения относительного равновесия, то размах колебаний возрастет в десятки раз и процесс обработки необходимо будет прервать.

Следует также учитывать то обстоятельство, что в результате эксплуатации НБВС положение центра масс обрабатываемого вала постоянно изменяется и сечение с максимальным статическим прогибом перемещается вдоль оси.

Таким образом, в результате теоретических и экспериментальных исследований условий обработки НБВС чашечными резцами с непрерывно обновляющейся кромкой установлено: наличие прогиба в статическом положении НБВС существенно снижает виброустойчивость процесса обработки и влияет на обеспечение точности; возникающее в результате обработки усилие резания приводит к существенному отклонению обрабатываемого вала от упругого состояния равновесия и соответственно к снижению виброустойчивости процесса обработки и искажению формы вала в продольном сечении; применение для обработки НБВС чашечных резцов с непрерывно обновляющейся кромкой позволяет за счет изменения скорости обновления режущей кромки в течение рабочего хода осуществлять изменение положения вершины режущего элемента по отношению к заготовке, тем самым управляя точностью обработки, и варьировать величиной составляющих усилия резания для поддержания виброустойчивости процесса обработки; влияние изменения положения центра масс вдоль длины обработки на точность и вибро-

устойчивость можно также компенсировать за счет изменения скорости обновления режущей кромки в соответствии с законом изменения положения сечения с максимальным результирующим перемещением вдоль длины обработки, учитывая при этом скорость формирования износа на рабочих поверхностях режущего элемента.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Жолобов, А. А.** Особенности обработки набивных бумажных валов суперкаландра (НБВС) резцами с обновляющейся режущей кромкой / А. А. Жолобов, В. А. Логвин // Вестн. Белорус.-Рос. ун-та. – 2006. – № 3. – С. 80–88.
2. **Жолобов, А. А.** Перспективы развития лезвийной обработки длинномерных изделий для бумажной промышленности / А. А. Жолобов, В. А. Логвин // Материалы, оборудование и ресурсосберегающие технологии : материалы междунар. науч.-техн. конф. – Могилев : Белорус.-Рос. ун-т, 2007. – Ч. 1. – С. 3–10.
3. **Беляев, Н. М.** Сопротивление материалов / Н. М. Беляев. – М. : Наука, 1965. – 856 с.
4. **Альмовский, А. А.** SolidWorks / COSMOSWorks. Инженерный анализ методом конечных элементов. – М. : ДМК Пресс, 2004. – 432 с.
5. **Сегерлинд, Л.** Применение метода конечных элементов / Л. Сегерлинд. – М. : Мир, 1979. – 392 с.
6. **Секулович, М.** Метод конечных элементов / М. Секулович. – М. : Стройиздат, 1993. – 664 с.
7. **Зенкевич, О.** Метод конечных элементов в технике / О. Зенкевич. – М. : Мир, 1979. – 541 с.

Белорусско-Российский университет
Материал поступил 15.02.2010

V. A. Logvin, A. A. Zholobov
Features of modelling of supercalander stack packed paper shafts for accuracy maintenance at processing with cup tools with continuously renovated cutting edge

In the article the order of construction of supercalander stack packed paper shafts (SSPPS) model which allows defining the size and arrangement of the section with the maximum static deflection at processing with continuously renovated cutting edge is offered. Influence of the size of the shaft deflection on accuracy and vibration resistance of SSPPS processing has been analyzed. The results of calculations of sizes of shaft deflection from the action of weight and chip loading are presented in the article, natural frequencies and mode shapes for maintenance of vibration resistance and achievement of the set accuracy at processing have been defined.