

**ОПРЕДЕЛЕНИЕ СИЛ РЕЗАНИЯ ПРИ ФРЕЗЕРОВАНИИ
ЭЛЕКТРОИЗОЛЯЦИОННОГО КАРТОНА**

© 2014

Д.А. Расторгуев, кандидат технических наук,
доцент кафедры «Оборудование и технологии машиностроительного производства»

И.В. Кузьмич, кандидат технических наук,
доцент кафедры «Оборудование и технологии машиностроительного производства»
Тольяттинский государственный университет, Тольятти (Россия)

Ключевые слова: электроизоляционный картон; фрезерование; сила резания; технологическая жесткость; деформация; трение; собственная частота; вейвлет-анализ.

Аннотация: В статье рассматриваются особенности обработки изолирующих деталей силовых трансформаторов из электроизоляционного картона холодного и горячего прессования. Особенностью обработки этого материала, изготавливаемого в виде спрессованных волокон целлюлозы хвойных пород деревьев в виде плит необходимой толщины, является зависимость сил резания от температурных условий, от ориентации слоев в плите. Рассмотрена технология обработки деталей из электроизоляционного картона, основным методом формообразования в которой является фрезерование. При этом используются фрезы цилиндрические, дисковые, концевые и торцевые. В статье предлагается для расчета сил фрезерования использовать аналитическую зависимость, учитывающую сдвиговые процессы в зоне стружкообразования, силы трения по задней и передней поверхностям инструмента, а также дополнительные составляющие силы трения при несвободном резании. Предлагается для учета температурных воздействий и связанных с ними пластификации связки, повышения сил вязкого сопротивления использовать в формуле реологическую модель для определения предельных напряжений. В ходе экспериментальных исследований по влиянию технологических факторов на силы резания правомерность использования предложенной аналитической зависимости доказана для низкоскоростного диапазона. Особенностью обработки в данном диапазоне является отсутствие пластической составляющей силы фрезерования при снятии стружки. Экспериментальные результаты выявили следующие отличия обработки электроизоляционного картона от металла. В спектре частот сигнала о смещениях инструментального шпинделя при обработке картона практически отсутствует зубцовая частота возмущений. Наглядно представлены результаты анализа высокочастотной составляющей колебаний, полученные при вейвлет-анализе. Также при обработке не отмечено колебаний на собственной частоте инструментальной подсистемы даже при предельных режимах обработки. В связи с растущей зависимостью силы резания от скорости это говорит о том, что при обработке данного материала автоколебания невозможны в рассмотренном скоростном диапазоне.

В обмотке силовых трансформаторов важную роль играют изолирующие детали, необходимые для обеспечения защиты от коротких замыканий, потерь энергии и обеспечения технологических размеров обмоток. От изоляции зависит срок службы трансформатора, обеспечение динамической устойчивости трансформатора при коротком замыкании и предотвращение распрессовки обмоток трансформатора. Ужесточение требований к этим параметрам привело к использованию материалов с более высокими физико-механическими свойствами, в частности, электроизоляционного картона холодного и горячего прессования. Электроизоляционный картон представляет собой спрессованные чистые волокна небеленой сульфат целлюлозы хвойных пород деревьев и поставляется в виде плит необходимой толщины. Блочный картон толщиной более 8 мм получают склеиванием отдельных листов горячепрессованного картона в обогреваемом прессе [1]. В качестве клея используется полиэфирно-эпоксидная смола.

Далее эта плита подвергается резке на раскroечном центре на полосы с припусками под дальнейшую обработку на калевочно-строгальном станке, на котором происходит четырехсторонняя обработка полос с необходимой шириной и высотой. Затем полученные полосы необходимой толщины и ширины складываются в пакет заготовок необходимой длины и происходит изготовление путем фрезерования концевыми и дисковыми фрезами дистанционных прокладок необходимой конфигурации (длины, типа паза: прямой,

ласточкин хвост, т-образный вид) и с заданной точностью.

Фрезерование концевыми, торцевыми, дисковыми и цилиндрическими фрезами – один из наиболее распространенных и высокопроизводительных методов обработки, применяемых при обработке трансформаторных изделий из электроизоляционного картона. Назначение обоснованных технологических параметров при фрезеровании электроизоляционного картона является необходимой производственной задачей.

В связи с широким применением в аэрокосмической, нефтехимической, автомобильной отраслях различных композиционных материалов, в том числе слоистых и с матрицей на основе эпоксидных смол, опубликовано много работ, посвященных вопросам их обработки, в том числе фрезерованием [2–9]. В работах, посвященных проблемам обработки слоистых или волокнистых композитов фрезерованием, рассматривается влияние на силы резания ориентации волокон или слоев с использованием нейросетевого и нечеткого методов [2], оценивается влияние технологических факторов на точность, качество обработанной поверхности, стойкость инструмента [3]. При этом применяется частотный анализ динамики процесса резания на основе измерений звуковых колебаний процесса резания [4], анализ колебаний силы резания с использованием вейвлет- и фрактального анализа [5], частотного анализа колебаний элементов упругой системы [6], где исследуются вопросы расслоения и перегрева матрицы.

Особенности динамики процесса фрезерования, связанные с неоднородностью структуры материала изделия, анизотропностью его свойств, при обработке слоистых композитных материалов с разными наполнителями, однотипны. Но во всех представленных работах рассматриваются материалы заготовок с наполнителями на основе или углерода, или стеклопластика, которые являются твердой фазой, повышают прочность материала и приводят к повышенному износу инструмента. Наполнители на основе органоластики, которыми являются листы картона, имеют ограниченное распространение и применяются только в электротехнической промышленности. Поэтому даже в таких объемных работах, как [10], где рассматриваются вопросы обработки резанием полимеров, неорганических и резиновых материалов, древесины, а также слоистых композиционных материалов с наполнителем из органоластики на тканевой основе (текстолитов), сведения по обработке материалов с наполнителями из картона или бумаги отсутствуют. В работе [11] рассматриваются вопросы упругого последействия при горячем прессовании листов из целлюлозы.

При этом информация по физико-механическим свойствам электроизоляционного картона новых марок отсутствует. Также не разработаны рекомендации по технологии обработки и режимам резания. Поэтому обработку электроизоляционного картона новых марок приходится выполнять, не опираясь на какие-либо записки или справочные данные.

Существует два основных подхода к методике расчета сил фрезерования: аналитический и эмпирический [12–14]. Первый основан на общих положениях теории разрушения и учитывает физико-механические параметры материала заготовки (предел прочности, предел текучести или твердость) [12]. Вторым подходом основан на обработке экспериментальных данных и получении регрессионных зависимостей при варьировании технологических режимов и конструктивных параметров инструмента [13; 14]. С учетом площади сечения снимаемой стружки и особенностей конкретного способа обработки выводится формула для расчета сил резания.

Для практических расчетов силы фрезерования аналитическим способом используем формулы для определения силы резания по [15].

Сила свободного резания при фрезеровании определяется по формуле:

$$P_Z = P_p + P_s + P_{t,1} + P_{t,2}, \quad (1)$$

где P_p – составляющая силы резания от пластической деформации, Н;

P_s – составляющая силы, необходимой для сдвига пластически деформированной зоны по плоскости сдвига, Н;

$P_{t,1}$ – составляющая от силы трения стружки по передней поверхности режущего клина, Н;

$P_{t,2}$ – составляющая силы от трения стружки по задней поверхности режущего клина, Н.

Все составляющие считаются по следующим формулам:

$$P_p = 1,155 \cdot \sigma_B \cdot k_s \cdot S_z \cdot B \left[1 + \mu_1(1 - t\gamma) + \frac{(0,5 + \mu)u}{2k_c} \right] \cos \gamma;$$

$$P_s = 1,155 \cdot \sigma_B \cdot k_s \cdot S_z \cdot B \frac{k_c}{4u \cdot \cos \gamma}; \quad (2)$$

$$P_{t,1} = 1,155 \cdot \sigma_B \cdot k_s \cdot S_z \cdot B \frac{\mu_2 l_3}{u h_1}; \quad (3)$$

$$P_{t,2} = 1,155 \cdot \sigma_B \cdot k_s \cdot S_z \cdot B \mu \sin \gamma. \quad (4)$$

Для дискового или цилиндрического фрезерования определяется дополнительная составляющая силы при несвободном резании:

$$P_{s,1} = 1,155 \cdot \sigma_B \cdot k_s \cdot S_z \cdot B \frac{k_c S_z}{2uB \cos \gamma},$$

где σ_B – предел прочности картона, МПа;

k_s – коэффициент площади среза;

$$k_s = 0,32 \frac{t_r Z}{D},$$

где t_r – глубина резания, мм;

Z – число зубьев фрезы;

D – диаметр фрезы;

S_z – подача на зуб, мм/зуб;

B – ширина фрезерования, мм;

μ, μ_1, μ_2 – коэффициенты трения стружки по передней и задней поверхностям фрезы;

l_3 – длина контакта по задней поверхности зуба фрезы, мм;

h_1 – усредненная толщина стружки, мм;

γ – передний угол, $\gamma=0$;

u – коэффициент переднего угла, который при $\gamma=0$ равен 1;

k_c – коэффициент усадки стружки.

Длина контакта по задней поверхности принималась равной ширине фаски фрезы по задней поверхности, что обусловлено отсутствием упругого последействия картона. Усредненная толщина стружки по всем рабочим зубьям фрезы находится по формуле:

$$h_1 = 0,05 + 0,25(S_z - 0,1).$$

Вышеприведенные формулы выведены для расчета силы резания металлов и сплавов, где вместо предела прочности подставляется предел текучести σ_{st} . При низкоскоростной обработке картона предел текучести σ_{st} у картона отсутствует, т. к. бумага пластически не деформируется, а связка хрупкая. Поэтому в формулу подставляется предел прочности картона σ_B . Так как связка в электротехническом картоне при низких скоростях не пластифицируется, материал пластически не деформируется, то коэффициент усадки стружки $k_c=1$. В силу вышеизложенных причин первое слагаемое P_p в формуле (1) можно исключить. Коэффициент трения металла по картону определялся экспериментально.

Для фрезерования концевой или торцевой фрезой сила резания определяется по формулам (2–4), где средний коэффициент площади среза находится по формуле:

$$k_s = 0,32 \frac{BZ}{D},$$

φ – угол в плане, $\varphi=90^\circ$.

Дополнительная составляющая при несвободном резании рассчитывается по формуле:

$$P_{s,2} = 1,155 \cdot \sigma_B \cdot k_s \cdot S_z \cdot \frac{k_c S_z}{2u \cos \gamma} \sin^2 \varphi.$$

Как уже было сказано, эмпирическая модель силы резания при обработке электротехнического картона отсутствует.

Для экспериментального определения силы резания при фрезеровании использовалась следующая методика. Технологическая система СПИЗ (станок – приспособление – инструмент – заготовка) является упругой системой. По сигналам с бесконтактных датчиков о смещении элементов станка определялась величина их деформации при резании. С учетом определенных экспериментально коэффициентов жесткости элементов станка находилась сила резания. Так как заготовки – образцы в экспериментах были разные, то и жесткость подсистемы заготовки изменялась. Поэтому регистрировались деформации шпиндельного узла.

Коэффициенты жесткости $k_{1,2}$ шпиндельного узла определялись из эксперимента по статическому нагружению в двух взаимно перпендикулярных направлениях. К измеряемой подсистеме прикладывалось через электронный динамометр фиксированное усилие с контролем величины деформации.

При резании, при различных режимах обработки, фиксировались смещения $y_{1,2}$ шпиндельного узла, вызванные силой резания в двух взаимно перпендикулярных направлениях. По формуле

$$P = k \cdot y \quad (5)$$

определялась величина силы резания P в двух взаимно перпендикулярных направлениях. После выводились регрессионные зависимости для сил резания методом наименьших квадратов.

В процессе проведения экспериментов рассчитывалось среднее значение силы резания и ее разброс – среднеквадратичное значение, что позволяет судить о динамической составляющей силы резания.

Уравнения регрессии, полученные после обработки результатов эксперимента, определялись для силы резания по формуле [16]:

$$y^T(x_1, x_2, x_3) = C_{0,0} + C_{1,0} \cdot x_1 + C_{2,0} \cdot x_2 + C_{3,0} \cdot x_3,$$

где y – значение средней силы резания;

C_{ij} – коэффициенты регрессии;

x_1, x_2, x_3 – соответственно переменные скорость резания v , подача на зуб S_z и глубина резания t_r , которые являются входными параметрами.

Деформация шпиндельного узла измерялась при помощи комплекта бесконтактных токовихревых датчиков смещений BENTLY-NEVADA. Сигнал с датчиков через АЦП L-Card регистрировался программой

L-Graph. Далее проводилась обработка статистических данных сигнала, определялось среднее значение и среднее квадратичное отклонение. По этим значениям по формуле (5) определялась сила резания. Коэффициент жесткости определялся в статических условиях, поэтому динамическая составляющая, для определения которой необходимо знать динамический коэффициент жесткости, далее не рассматривается.

В каждой точке экспериментального плана проводилось несколько опытов с целью проверки их стабильности. Для исключения влияния посторонних факторов на результаты эксперименты рандомизированы. Для проверки гипотезы об однородности дисперсий использовался G -критерий Кохрена [16]. Гипотеза об однородности дисперсий подтверждается для всех экспериментов, т. к. найденное значение G было меньше $G_{\text{табл}}=0,781$ при уровне значимости $\alpha=0,05$; числе серий экспериментов $N=8$ и числе степеней свободы $f=1$ [16]. Коэффициенты регрессии математической модели рассчитывались по методу наименьших квадратов:

$$C = (D^T D)^{-1} D^T Y,$$

где D – матрица значений входных параметров;

Y – матрица значений выходных параметров.

Оценка значимости полученных коэффициентов производилась с использованием критерия Стьюдента (t_s -критерия) [16]. Для проверки гипотезы об адекватности найденной модели использовался F -критерий Фишера.

После обработки результатов эксперимента получены следующие зависимости.

Для дискового фрезерования экспериментальная формула по расчету силы резания:

$$P = -1,093 + 759 \cdot S_z + 1,168 \cdot t. \quad (6)$$

Для концевое фрезерования экспериментальная формула по расчету силы резания:

$$P = -0,514 + 0,003 \cdot V + 7,697 \cdot S_z + 0,483 \cdot t. \quad (7)$$

Из формул (6) и (7) можно сделать вывод о том, что при работе фрезами наибольшее влияние на силу резания и ее динамическую составляющую оказывают подача на зуб и глубина резания. В то же время скорость резания практически не влияет на силу резания (для фрезерования концевыми фрезами). Полученные эмпирические зависимости позволяют определить среднюю силу резания при фрезеровании деталей из электротехнического картона при низких скоростях резания (до 100 м/мин).

Для сравнения результатов расчета по аналитическим и эмпирическим формулам на рис. 1 приведены зависимости, построенные по формуле (1) с учетом составляющей силы резания от пластической деформации $P1$ и без нее $P2$, и по экспериментальным зависимостям $W1$ (6), (7).

Полученные в результате экспериментов эмпирические и аналитические формулы показали хорошую сходимость (максимальная погрешность 12 %). Небольшие

силы резания (максимальные значения при торцовом фрезеровании порядка 10–30 Н) обусловлены отсутствием силы сопротивления пластической составляющей деформации, меньшим пределом прочности картона при сравнении с пределом текучести сталей.

По полученным зависимостям требуется уточнение по скоростной зависимости силы резания. Исследования, результаты которых приведены выше, проводились на станке PROMA при максимальных оборотах инструментального шпинделя 1750 об/мин при диаметре фрезы до 20 мм. Это обеспечивает скорости резания до 110 м/мин. В производственных условиях, если обработка ведется на станках Weing или Powermat 1000, инструментом диаметром до 250 мм, скорость резания может составить до 3000 м/мин. Производственная практика показала, что нагрев зоны резания приводит к пластификации связующего вещества и с ростом скорости резания к его плавлению. Реально происходит наплавление связки на режущие элементы с изменением условий резания и потерей качества обработки. Даже при низких скоростях зависимость силы резания от скорости носит возрастающий характер. Этот эффект

обусловлен ростом вязкого сопротивления. Для расширения диапазона использования предложенных формул необходимо учесть вязкую составляющую силы трения. Для моделирования нагружения двух компонентных композитных упруго-вязких систем предлагается реологический подход [11; 17]. Для этого необходимо определить зависимые от температуры реологические свойства электроизоляционного картона. Для учета вязкого сопротивления при пластификации связки из-за роста температуры при высокоскоростной обработке вместо предела прочности при статическом нагружении предлагается использовать реологическую модель Кельвина, учитывающую вязкую составляющую сопротивления [18]:

$$E_2\varepsilon + \beta\dot{\varepsilon} = (1 + E_2/E_1)\sigma + \beta/E_1\dot{\sigma},$$

где E_1 и E_2 – модули упрочнения и упругости, соответственно, МПа;

β – коэффициент вязкого сопротивления, МПа·с;

ε – деформация;

σ – напряжения, МПа.

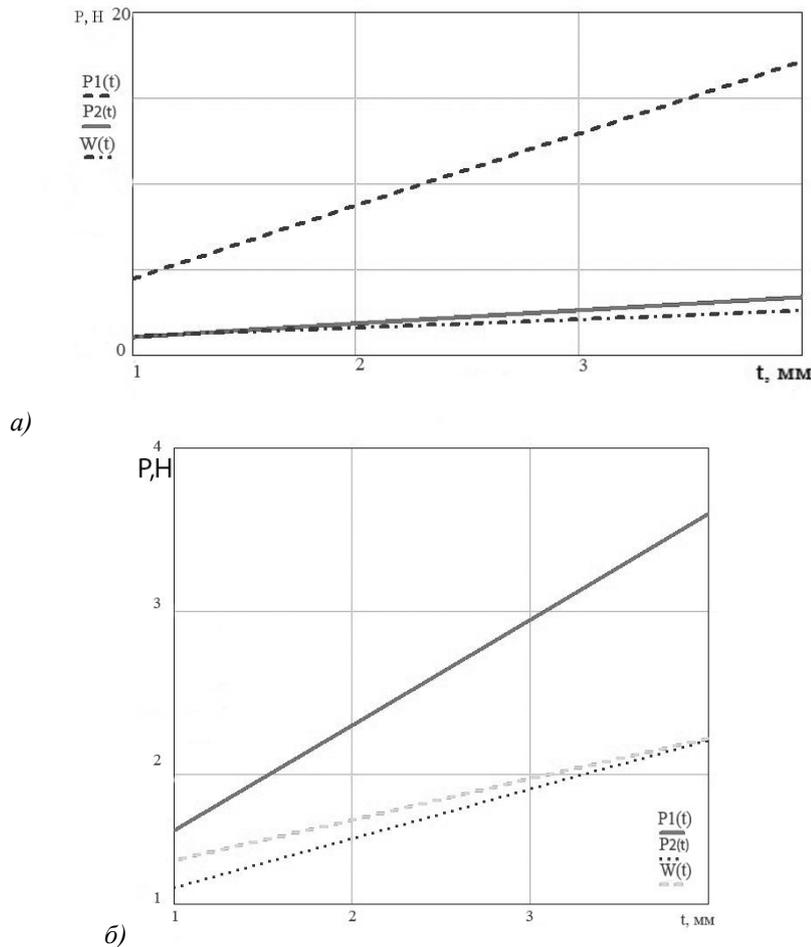


Рис. 1. Графики зависимости силы фрезерования от глубины резания, полученные аналитически и по эмпирическим зависимостям:

а – фрезерование концевой фрезой; *б* – фрезерование дисковой фрезой ($P1$ – сила, рассчитанная по формуле (1) с учетом пластической составляющей; $P2$ – сила, рассчитанная по формуле (1) без учета пластической составляющей; W – экспериментальные зависимости по формулам (6), (7))

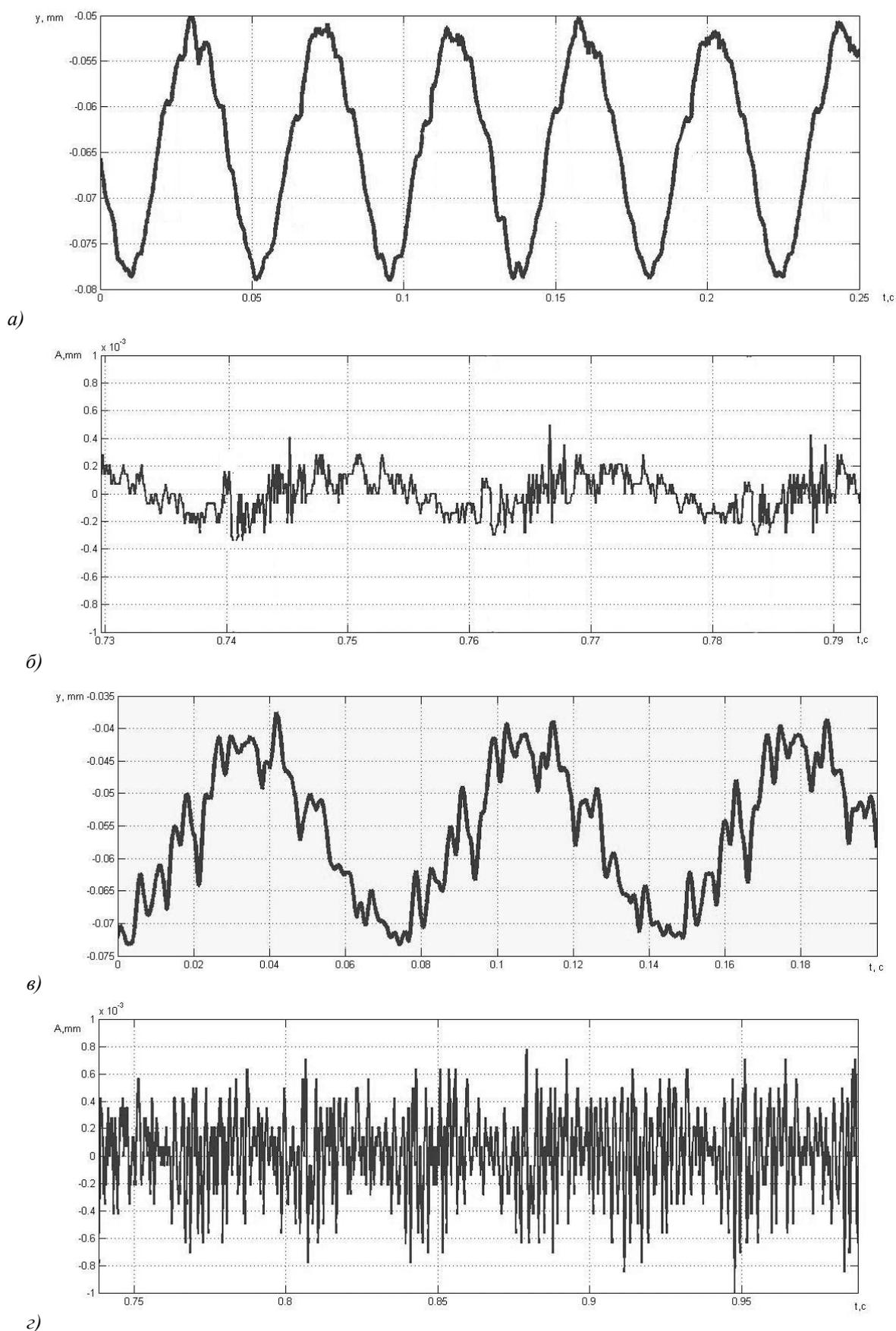


Рис. 2. Запись сигнала смещения шпинделя при фрезеровании и его высокочастотная составляющая: а, б – при обработке картона; в, з – при обработке металла

Причем модули являются температурно-зависимыми. При фрезеровании нестабильность сил резания вызывается не только колебаниями припуска, твердости материала, различной жесткостью заготовки при фрезеровании, но и самой кинематикой резания, когда на каждом зубе толщина снимаемого слоя изменяется, а также меняется число одновременно работающих зубьев.

Из полученных результатов по исследованию динамики фрезерования выявились следующие отличия процесса резания картона и металла. В связи с возрастающей зависимостью силы резания от скорости и коэффициента трения металла по картону, автоколебания при резании не отмечены при самых интенсивных режимах обработки. Это видно по спектрограммам сигнала смещения инструментального шпинделя, записанного при фрезеровании. При фрезеровании картона на спектре отмечены пиковые частоты, соответствующие только оборотной частоте и ее гармоникам. При резании металлов кроме оборотной частоты выделяется зубцовая частота. В данном случае шестая гармоника, поскольку обработка велась фрезой с шестью зубьями. Также выделяется на спектре частота, соответствующая собственной частоте инструментальной подсистемы. Значения собственных частот предварительно определялись по спектру затухающих колебаний. Данные особенности сигналов хорошо видны на рис. 2, где представлена развертка записи сигнала о смещении шпинделя. В результате анализа сигнала смещения методом вейвлет-разложения [5; 19] получены высокочастотные детализирующие коэффициенты. Для разложения сигнала использовался вейвлет Добеши.

Обобщая все вышесказанное, по результатам работы сделаны следующие выводы:

1. Установлены зависимости сил фрезерования для дисковых и концевых фрез при обработке электроизоляционного картона на основе экспериментальных исследований.

2. Предложена аналитическая модель сил при фрезеровании для дисковых, цилиндрических, торцовых и концевых фрез при обработке электроизоляционного картона на основе аналогии с силовыми зависимостями при обработке металлов с уточнением отличий и особенностей процесса резания картона, показавшая хорошую сходимость с экспериментальными данными.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- ГОСТ 2824-86. Картон электроизоляционный. Технические условия; введ. 01.01.88. Москва: Изд-во стандартов, 1996. 11 с.
- Azmi A.I., Lin R.J.T., Bhattacharyya D. Tool wear prediction models during end milling of glass fibre-reinforced polymer composites // *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*. 2013. Vol. 67. P. 701–718.
- Azmi A.I., Lin R.J.T., Bhattacharyya D. Machinability study of glass fibre-reinforced polymer composites during end milling // *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*. 2013. Vol. 64. P. 247–261.
- Zdenek F., Piska M., Jaros A. On the analysis of the sound spectrum at machining of the glass-polyester composite material // *Brno university of technology. Faculty of mechanical engineering. Department of manufacturing technology*. 2013. March. P. 458–459.

- Sen A.K., Litak G., Syta A., Rusinek R. Intermittency and multiscale dynamics in milling of fiber reinforced composites // *Meccanica*. 2013. Vol. 48. P. 783–789.
- Chibane H., Marndeau A., Serra R., Bouchou A., Leroy R. Optimal milling conditions for carbon/epoxy composite material using damage and vibration analysis // *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*. 2013. Vol. 68. P. 1111–1121.
- Формирование режущей кромки фрезерного инструмента для обработки слоистых композиционных материалов, армированных стеклянными волокнами / Д.А. Рычков [и др.] // *Системы. Методы. Технологии*. 2014. № 2. С. 42–46.
- Особенности фрезерования полимерных композиционных материалов / А.С. Янюшкин [и др.] // *Системы. Методы. Технологии*. 2013. № 2. С. 88–90.
- Тарасюк А.П. Влияние условий процесса резания на механические свойства анизотропных полимеров // *Вестник Черниговского государственного технологического университета. Серия: Технические науки*. 2012. № 4. С. 49–57.
- Корягин С.И., Пименов И.В., Худяков В.К. Способы обработки материалов. Калининград: Калининградский ун-т, 2000. 448 с.
- Golzar M., Ghaderi A. Effect of temperature on the spring back of cellulose-based sheet in hot pressing // *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*. 2009. Vol. 42. P. 633–642.
- Расторгуев Д.А., Царев А.А. Моделирование процесса фрезерования концевыми фрезами // *Известия Самарского научного центра РАН*. 2008. № S7. С. 178–183.
- Васин С.А. Прогнозирование виброустойчивости при точении и фрезеровании. М.: Машиностроение, 2006. 384 с.
- Справочник технолога-машиностроителя. В 2 т. Т. 2. 4-е изд. М.: Машиностроение, 1985. 496 с.
- Воронцов А.Л., Албагачиев А.Ю., Султан-заде Н.М. Теоретические основы обработки металлов в машиностроении. Старый Оскол: ТНТ, 2014. 552 с.
- Адлер Ю.П., Маркова Е.В., Грановский Ю.В. Планирование эксперимента при поиске оптимальных условий. М.: Наука, 1976. 280 с.
- Протасьев В.Б., Омельченко Л.А. Учет реологических свойств обрабатываемых материалов при использовании процессов резания // *Известия Тульского государственного университета. Серия: Технические науки*. 2014. № 4. С. 122–127.
- Драчев О.И., Расторгуев Д.А., Старостина М.В. Моделирование упруго-пластических деформаций при термосиловой обработке // *Вектор науки Тольяттинского государственного университета*. 2012. № 3. С. 80–85.
- Драчев О.И., Расторгуев Д.А. Исследование динамики процесса резания методом вейвлет анализа // *Металлообработка*. 2008. № 4. С. 2–6.

REFERENCES

- GOST 2824-86. Karton elektroizolyatsionniy. Tehnicheskie usloviya* [State Standart 2824-86. Electrical insulating board. Technical regulation]. Moscow, Standartinform Publ., 1996. 11 p.

2. Azmi A.I., Lin R.J.T., Bhattacharyya D. Tool wear prediction models during end milling of glass fibre-reinforced polymer composites. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 2013, vol. 67, pp. 701–718.
3. Azmi A.I., Lin R.J.T., Bhattacharyya D. Machinability study of glass fibre-reinforced polymer composites during end milling. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 2013, vol. 64, pp. 247–261.
4. Zdenek F., Piska M., Jaros A. On the analysis of the sound spectrum at machining of the glass-polyester composite material. *Brno university of technology. Faculty of mechanical engineering. Department of manufacturing technology*, 2013, March, pp. 458–459.
5. Sen A.K., Litak G., Syta A., Rusinek R. Intermittency and multiscale dynamics in milling of fiber reinforced composites. *Meccanica*, 2013, vol. 48, pp. 783–789.
6. Chibane H., Mardeau A., Serra R., Bouchou A., Leroy R. Optimal milling conditions for carbon/epoxy composite material using damage and vibration analysis. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 2013, vol. 68, pp. 1111–1121.
7. Richkov D.A. et al. Forming of cutting edge of tool for processing fiberglass-reinforced laminar composites. *Sistemi. Metodi. Tehnologii*, 2014, no. 2, pp. 42–46.
8. Yanushkin A.S. et al. Aspects of polymeric composites milling. *Sistemi. Metodi. Tehnologii*, 2013, no. 2, pp. 88–90.
9. Tarasyuk A.P. The influence of cutting process conditions on mechanical characteristics of anisotropic polymers. *Vestnik Chernigovskogo gosudarstvennogo tehnologicheskogo universiteta. Seriya Tehnicheskie nauki*, 2012, no. 4, pp. 49–57.
10. Koryagin S.I., Pimenov I.V., Hudyakov V.K. *Sposobi obrabotki materialov* [Metal processing methods]. Kaliningrad, Kaliningradskiy universitet publ., 2000, 448 p.
11. Golzar M., Ghaderi A. Effect of temperature on the spring back of cellulose-based sheet in hot pressing. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 2009, vol. 42, pp. 633–642.
12. Rastorguev D.A., Tsarev A.A. Simulation of milling when using the end mills. *Izvestiya Samarского nauchnogo centra RAN*, 2008, no. S7, pp. 178–183.
13. Vasin S.A. *Prognozirovaniye vibraustoychivosti pri tochenii i frezerovanii* [Prediction of vibration-resistance during turning and milling]. Moscow, Mashinostroenie publ., 2006, 384 p.
14. *Spravochnik tehnologa-mashinostroitel'ya*. Vol. 2 [Guide for machine engineers]. 4th ed. Moscow, Mashinostroenie publ., 1985, 496 p.
15. Vorontsov A.L., Albagachiev A.U., Sultan-zade N.M. *Teoreticheskie osnovy obrabotki metallov v mashinostroenii* [Theoretical basics of metal processing in machine engineering]. Stariy Oskol, TNT publ., 2014, 552 p.
16. Adler U.P., Markova E.V., Granovskiy U.V. *Planirovaniye eksperimenta pri poiske optimalnih usloviy* [Design of experiment when selecting optimal conditions]. Moscow, Nauka publ., 1976, 280 p.
17. Protasyev V.B., Omilchenko L.A. Registration of rheological characteristics of the processed materials when using the cutting process. *Izvestiya Tul'skogo gosudarstvennogo universiteta. Seriya Tehnicheskie nauki*, 2014, no. 4, pp. 122–127.
18. Drachev O.I., Rastorguev D.A., Starostina M.V. Simulation of plastoelastic deformations during thermal power processing. *Vektor nauki Tolyattinskogo gosudarstvennogo universiteta*, 2012, no. 3, pp. 80–85.
19. Drachev O.I., Rastorguev D.A. The study of cutting process history using the wavelet analysis method. *Metalloobrabotka*, 2008, no. 4, pp. 2–6.

DETERMINATION OF CUTTING FORCES WHEN MILLING ELECTRICAL INSULATING BOARD

© 2014

D.A. Rastorguev, candidate of technical sciences,

Associate Professor of the Department «Equipment and Technologies of Mechanical Engineering»

I.V. Kuzmich, candidate of technical sciences,

Associate Professor of the Department «Equipment and Technologies of Mechanical Engineering»

Togliatti state University, Togliatti (Russia)

Keywords: electrical insulating board; milling; cutting force; process hardness; deformation; friction; natural frequency; wavelet analysis.

Annotation: The article discusses the features of processing of power transformers isolating parts made of electrical insulating cold- and hot-pressed board. Specific feature of processing of this material, manufactured as a pressed softwood cellulose fiber in the form of plates of required thickness, is the dependence of cutting forces on the temperature conditions, and the texturing of layers in the plate. The authors describe the technology of processing parts of electrical insulating board the main forming method of which is milling. This process uses cylindrical, disc, face and end mills. When calculating the milling forces the article offers to use analytical dependence considering shear processes in the chip area, the friction forces on the front and rear surfaces of the tool, as well as additional components of friction force during forced cutting. To register temperature exposure and associated adhesive plasticization, as well as the increase of viscous forces, it is proposed to use the rheological model in the formula for determining of limit stresses. Experimental research of the influence of technological factors on cutting forces proved the appropriateness of application of suggested analytical dependence for low-speed range. The specific feature of processing in this range is the absence of milling force plastic component during chip removing. Experimental results showed the following differences in processing electrical insulating board and metal. When processing board, tooth mesh frequency of disturbances is practically non-existent within the spectrum of frequency of the cutter spindle drift signal. The article shows visually the results of analysis of the high frequency component of oscillations obtained during the wavelet analysis. Besides, during processing, the oscillations are not observed at natural frequency of tool intersystem even under the limit processing conditions. Due to the increasing dependence of cutting force on velocity, this fact shows that self-oscillations are not possible within studied speed range during processing this material.