

УДК 674.055

П. В. Рудак, кандидат технических наук, старший преподаватель (БГТУ);
Д. В. Куис, кандидат технических наук, доцент, заведующий кафедрой (БГТУ);
В. В. Раповец, кандидат технических наук, ассистент (БГТУ)

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ТРИБОТЕХНИЧЕСКИХ СВОЙСТВ ТВЕРДОСПЛАВНЫХ НЕПЕРЕТАЧИВАЕМЫХ РЕЖУЩИХ ПЛАСТИН С ВАКУУМНО-ПЛАЗМЕННЫМИ ПОКРЫТИЯМИ ПРИ ЦИЛИНДРИЧЕСКОМ ФРЕЗЕРОВАНИИ ДРЕВЕСНОСТРУЖЕЧНЫХ ПЛИТ

В статье приводятся методика и результаты экспериментальных исследований коэффициентов трения, характеризующих процесс обработки древесностружечных плит хвостовыми фрезами, оснащенными твердосплавными неперетачиваемыми ножами с вакуумно-плазменными покрытиями. Разработанная методика определения коэффициента трения задней поверхности лезвия и примыкающей к ней части режущей кромки при фрезеровании основывается на синхронном динамометрировании касательной и нормальной сил резания по задней поверхности лезвия в процессе резания с нулевой высотой снимаемого припуска. Результаты исследований позволили выполнить научное обоснование триботехнических характеристик вакуумно-плазменных покрытий, нанесенных на режущие элементы, оптимизации параметров покрытий и режимов резания.

The article presents the methodology and results of experimental studies of friction coefficients that characterize the processing of chipboard tail cutters, knives equipped with vacuum-plasma coatings. The developed technique for determining the coefficient of friction of the back of the blade and the adjacent part of the cutting edge in milling based on the simultaneous registration of the tangential and normal cutting forces on the back of the blade during the cutting process with zero height allowance being taken. The research results have allowed to perform scientific basis of tribological characteristics of vacuum-plasma coatings deposited on the cutting elements, optimization of coating parameters.

Введение. При разработке составов эффективных ионно-плазменных покрытий дерево-режущего инструмента следует учитывать особые условия его эксплуатации, в частности величины усилий, действующих на поверхностях режущего клина. Эти усилия могут быть рассчитаны по известным аналитическим соотношениям теорий резания древесины и древесных материалов. Точность данных расчетов решающим образом зависит от достоверности констант, в том числе и коэффициентов трения.

Известно, что изменение коэффициента трения при резании равносильно изменению угла резания и приводит к изменению формы стружкообразования. С уменьшением коэффициента трения стружка будет приближаться к сливной. Поэтому уменьшение коэффициента трения приводит также к улучшению качества обработки древесины [1].

Особенности трения в условиях резания древесных материалов по сравнению с обработкой других материалов ставит серьезные ограничения на применение стандартных методик определения триботехнических свойств дереворежущих резцов.

Фрезерование древесных материалов осуществляют при высоких частотах вращения инструмента, что характеризует такой процесс резания, как высокоциклический. При этом сила резания при встречном фрезеровании меняется от минимального до максимального значения

по мере увеличения толщины стружки при движении ножа по дуге контакта с обрабатываемым материалом.

Обрабатываемый древесный материал и образующаяся стружка обладают низкой теплопроводностью, в связи с этим практически вся теплота, образующаяся при резании, поглощается весьма ограниченной по площади зоной реза, которая может нагреваться до высоких температур (около 800°C и более). Тепловые явления при резании оказывают значительное влияние на изменение микрогеометрии лезвия, а таким образом, и на износ инструмента. Известно, что значительно увеличивают интенсивность износа продукты термодеструкции древесины, особенно их фракция, содержащая органические кислоты.

Древесный материал обладает высокой упругостью – в зоне резания возможны упругие восстановления, причем в связи с волокнистым строением древесной основы процесс резания начинается только после достижения в волокнах достаточных механических напряжений – до этого лезвие сминает частицы обрабатываемого материала.

В связи с особенностями технологии изготовления физико-механические свойства древесностружечной плиты плоского прессования неравномерны по толщине и, как следствие, лезвие инструмента испытывает неравномерные механические, тепловые и другие нагрузки по своей длине – непостоянны и коэффициенты трения.

Наличие в древесностружечной плите твердых частиц законденсированного связующего (как правило, 8–12% карбамидоформальдегидной смолы) оказывает значительное влияние на процесс резания – возможна реализация механизмов контактной усталости. Низкая влажность древесной основы плиты, наличие законденсированного полимера в условиях высокой цикличности процесса резания могут приводить к электроэрозионному износу резцов.

Указанные особенности процесса резания древесностружечных плит значительны и уникальны – не могут быть всецело воссозданы на испытательных машинах для исследования триботехнических характеристик по стандартным методикам (например, по схеме возвратно-поступательного движения контактирующих тел на трибометре).

Таким образом, коэффициент трения следует устанавливать по результатам экспериментальных исследований в условиях реального процесса резания. Такие данные отсутствовали.

Цель работы – в реальных условиях фрезерования в широких диапазонах параметров режима резания установить коэффициенты трения, характеризующие процесс обработки древесностружечных плит (ДСтП) инструментом, оснащенным ножами из вольфрамокобальтового твердого сплава с вакуумно-плазменными покрытиями.

Основная часть. При проникновении лезвия в древесный материал на контактной поверхности лезвия создаются нормальное давление и силы трения. Для анализа процессов резания контактная поверхность может быть разделена на зоны. Для школы А. Л. Бершадского характерно деление контактного контура на две зоны [1] – передней и задней поверхностей.

Передняя поверхность лезвия деформирует срезаемый слой и стружку, создает в них напряжения и удаляет стружку. Сжатие срезаемого слоя и стружки при резании происходит в полужамкнутом пространстве. В теории резания древесины и древесных материалов принимают, что давление стружки на переднюю поверхность распределено равномерно. Режущая кромка надрезает материал в срезаемом слое, а передняя грань удаляет его.

Задняя поверхность лезвия испытывает нормальное давление со стороны обрабатываемого материала вследствие упругого восстановления обработанной поверхности. Так как деформации под задней поверхностью упругие, то эпюру нормальных давлений на ней можно принять треугольной. Заменяя эпюры нормальных давлений по контактными площадкам лезвия сосредоточенными усилиями, переходим к силам резания.

Заменяем эпюру нормальных давлений в зоне передней поверхности лезвия сосредоточенной силой N и векторно прибавим к ней силу трения T (рис. 1).

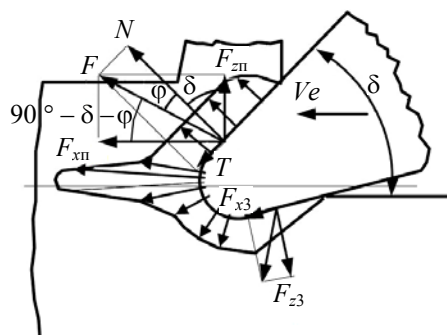


Рис. 1. Схема сил на лезвии ножа

Полученную силу F спроецируем на направление V_e скорости главного движения и на нормаль к нему. Получим следующие силы: $F_{зп}$ – касательную силу резания по передней поверхности; $F_{нп}$ – нормальную силу резания по передней поверхности.

Радиальная составляющая силы резания находится путем следующих рассуждений. Силы N и F образуют между собой угол трения φ ($\varphi = \arctg \mu$, где μ – коэффициент трения древесины по передней грани). При этом силы $F_{зп}$ и $F_{нп}$ связаны между собой следующим уравнением:

$$F_{зп} = F_{нп} \operatorname{tg}(90^\circ - \delta - \varphi), \quad (1)$$

где δ – угол резания.

Обращаясь к силам резания на задней грани, можно получить касательную силу резания по задней поверхности $F_{зз}$ и нормальную силу резания по задней поверхности $F_{нз}$. Так как упругопластическое деформирование поверхности резания задней гранью невелико (на величину радиуса округления режущей кромки, то есть не более 0,06 мм), можно рассматривать касательную силу по задней грани как силу трения:

$$F_{зз} = f \cdot F_{нз}, \quad (2)$$

где f – коэффициент трения по задней поверхности лезвия.

Сила $F_{зз}$ есть усилие, необходимое для углубления лезвия в поверхность резания на величину радиуса закругления режущей кромки.

При исследованиях триботехнических свойств неплетачиваемых твердосплавных пластин с вакуумно-плазменными покрытиями, с целью разработки составов эффективных покрытий, с ориентацией на резание ДСтП целесообразно определять значение коэффициента трения задней поверхности лезвия и примыкающей к ней части режущей кромки.

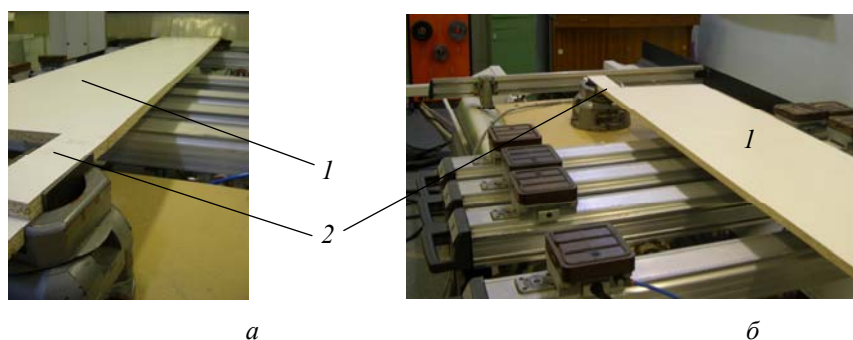


Рис. 2. Схема крепления заготовок на рабочих столах станка при проведении экспериментов:

1 – заготовка ДСтП на первом рабочем столе;
2 – заготовка ДСтП для динамометрирования

Разработанная на кафедре материаловедения и технологии металлов БГТУ методика определения коэффициента трения f задней поверхности лезвия и примыкающей к ней части режущей кромки при фрезеровании ДСтП основывается на синхронном динамометрировании касательной и нормальной сил резания по задней поверхности лезвия в процессе фрезерования с нулевой высотой снимаемого припуска.

Экспериментальная установка для реализации разработанной методики создана на базе современного деревообрабатывающего центра с ЧПУ ROVER B 4.35

Заготовка ДСтП на первом рабочем столе станка 1 (рис. 2, а) устанавливается встык с заготовкой для динамометрирования 2 (рис. 2, б).

Динамометр УДМ с зафиксированной заготовкой 2 жестко закреплена на втором столе станка. Регистрирующий прибор – тензометрическая измерительная система EX – UT10 с i.Link интерфейсом (фирма SONY, Япония), опрашивает тензодатчики УДМ и позволяет синхронно определять усилия по трем взаимно перпендикулярным направлениям, а также величину момента в горизонтальной плоскости. Тарировка измерительной системы экспериментальной установки осуществлялась путем нагружения через образец ДСтП, используемый в экспериментальных исследованиях, тензометрических датчиков универсального динамометра УДМ по трем координатным осям X , Y , Z статически при помощи поверенного универсального образцового динамометра ДОУ-3-1 кН в диапазоне 0...1000 Н. Линейная зависимость показаний датчиков используемого универсального динамометра от прилагаемой нагрузки подтверждает работоспособность датчиков в зоне упругих деформаций в пределах диапазона прилагаемых нагрузок.

Режущие элементы, используемые в качестве основы для нанесения покрытия, – неперетачиваемые пластины вольфрамокобальтового твердого сплава SMG 02. После каждого эксперимента фреза

с резцом смещалась (заменялся нож) – обработка велась острой областью режущего элемента

Обрабатываемый материал – древесностружечная плита с отделкой с двух сторон ламинатом (EN 14322) производства компании «Pfleiderer Grajewo S.A.» (Польша). Толщина плиты – 18 мм.

Средняя плотность – 650 кг/м³ – контролировалась определением средней массы по результатам замеров для 5 кубиков 18×18×18 мм, вырезанных с различных участков плиты.

Размеры заготовки для динамометрирования – 68×300×18 мм. Размеры заготовки для предварительной обработки – 2700×500×18 мм. Тип применяемого инструмента – однозубая концевая фреза. Диаметр окружности резания концевой фрезы – 21 мм. Тип применяемого патрона – ISO32.

Для определения необходимого числа наблюдений исходили из условий, что дисперсия измеряемой величины постоянна и известна, а ее распределение является нормальным. Данные характеристики выявлены в результате проведенных предварительных экспериментальных измерений выходных величин на этапе отладки экспериментальной установки.

Гипотеза нормального распределения измеряемой величины была проверена по критерию Пирсона χ^2 [2]. Для этого была поставлена серия опытов в центре эксперимента с наибольшей вариацией измеряемой величины. Количество опытов – 128 отсчетов (фиксирования составляющих сил резания с пересчетом в соответствующие значения коэффициента трения f) в интервале стабильного протекания процесса резания.

В результате выполненных расчетов необходимое число дублированных опытов при изучении коэффициента трения f составило 2,34 раза.

При выполнении экспериментальных исследований было принято трехкратное повторение каждого опыта методической сетки и определялись средние значения коэффициентов трения задней поверхности лезвия и примыкающей к ней части режущей кромки за периоды покоя и скольжения.

Структура экспериментальных исследований коэффициента трения f при фрезеровании ДСтП включала проведение серии однофакторных опытов с дублированием. При стабилизации одного из факторов частота вращения принималась $14\ 000\ \text{мин}^{-1}$, а скорость подачи – $6\ \text{м/мин}$. Отдельно испытывались резцы без покрытия и с покрытием TiN.

Методическая сетка опытов с результатами представлена в таблице.

Методическая сетка опытов

№ опыта	Частота вращения фрезы n , мин	Скорость подачи, V_s , м/мин	f	№ опыта	Частота вращения фрезы n , мин	V_s , м/мин	f
Резец без покрытия							
Влияние частоты вращения				Влияние скорости подачи			
1	10 000	6	0,6	6	14 000	2	1,6
2	12 000		0,7	7		4	1,0
3	14 000		0,9	8		6	0,9
4	16 000		1,3	9		8	1,7
5	18 000		1,6	10		10	1,8
Резец с покрытием							
Влияние частоты вращения				Влияние скорости подачи			
11	10 000	6	0,5	16	14 000	2	1,3
12	12 000		0,5	17		4	0,6
13	14 000		0,6	18		6	0,6
14	16 000		1,0	19		8	1,4
15	18 000		1,3	20		10	1,6

Перед динамометрированием выполнялось фрезерование закрепленных встык заготовок на первом и втором столе станка со снятием припуска $3\ \text{мм}$ для устранения погрешностей установки заготовок. Данные подвергались математической фильтрации с применением цифрового запоминающего осциллографа, после чего рассчитывались коэффициенты трения [3].

Результаты экспериментов представлены в виде графических зависимостей (рис. 3, 4).

Заключение. Установлено, что резцы с вакуумно-плазменными покрытиями на основе TiN в реальных условиях эксплуатации характеризуются меньшими коэффициентами трения по сравнению с резцами без покрытий.

Анализ графических зависимостей на рис. 3 и рис. 4 позволяет сделать вывод о рациональности применения режима резания – скорость подачи $2\text{--}6\ \text{м/мин}$, частота вращения фрезы – $10\ 000\text{--}12\ 000\ \text{мин}^{-1}$ с точки зрения минимизации коэффициента трения.

Полученные результаты позволили произвести научное обоснование триботехнических качеств вакуумно-плазменных покрытий,

нанесенных на режущие элементы этого инструмента, что является основой оптимизации параметров покрытий и режимов обработки ДСтП фрезерованием.

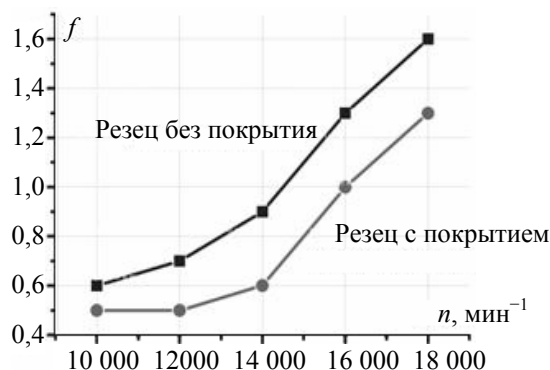


Рис. 3. Зависимость коэффициента трения f от частоты вращения хвостовой фрезы n

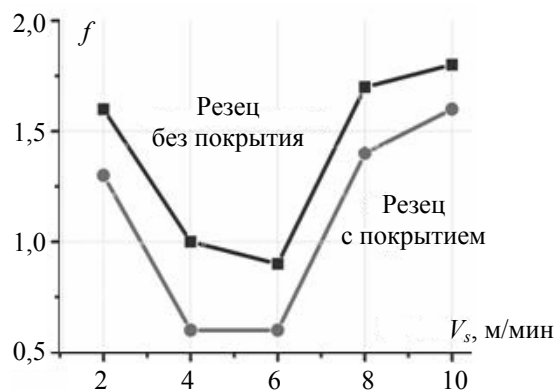


Рис. 4. Зависимость коэффициента трения f от скорости подачи V_s

Разработанная методика триботехнических испытаний инструмента при фрезеровании ДСтП представляет большое значение для установления закономерностей образования стружки, движения частиц стружки и пыли в зоне резания древесины и древесных материалов при фрезеровании в широких диапазонах параметров режима резания, для разработки методики и устройства улавливания стружки и пыли.

Литература

1. Бершадский, А. Л. Резание древесины / А. Л. Бершадский, Н. И. Цветкова. – Минск: Выш. шк., 1975. – 304 с.
2. Пижурин, А. А. Моделирование и оптимизация процессов деревообработки: учебник / А. А. Пижурин, А. А. Пижурин. – М.: МГУЛ, 2004. – 375 с.
3. Гольденберг, Л. М. Цифровая обработка сигналов / Л. М. Гольденберг, Б. Д. Матюшкин, М. Н. Поляк. – М.: Радио и связь, 1990. – 256 с.

Поступила 14.03.2012