

ТЕХНОЛОГИЯ ЗАГОТОВКИ И МЕХАНИЧЕСКОЙ ОБРАБОТКИ ДРЕВЕСИНЫ

УДК 674.815

DOI: 10.53374/1993-0135-2023-2-185-193

Хвойные бореальной зоны. 2023. Т. XLI, № 2. С. 185–193

ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ СИЛЫ ТРЕНИЯ НА ШЕРОХОВАТОСТЬ ПОВЕРХНОСТИ ДРЕВЕСНОСТРУЖЕЧНЫХ ПЛИТ И НА ИЗНОС ИНСТРУМЕНТА

П. В. Цаплин, В. Г. Межов, А. В. Кустов, Е. А. Заболотская, Я. С. Гончарова

Сибирский государственный университет науки и технологий имени академика М. Ф. Решетнева
Российская Федерация, 660037, г. Красноярск, просп. им. газеты «Красноярский рабочий», 31
E-mail: tsaplinpv@sibsau.ru

В статье рассматриваются физические характеристики древесностружечных плит, влияющих на трение обрабатывающего инструмента и его износ. Метод термосилового воздействия на поверхность древесностружечных плит при их обработке для мебельного производства, является инновационным методом, исключающим основные недостатки обработки шлифовальными лентами, а именно: образование невозвратных отходов производства, волнистости, ворсистости поверхности, высокой потребляемой мощности. Данный метод термосилового воздействия требует более детального рассмотрения, и, в частности, влияние трения и температуры на грева на обрабатывающий инструмент. Одна из ключевых физических характеристик древесностружечных плит - шероховатость, которая существенно влияет на износ инструмента. Рассмотрены фрикционные свойства материала обрабатывающего инструмента и их влияние на температурные показатели. Древесностружечная плита как полимер имеет свойства деформироваться под действием внешней нагрузки и температуры. Поэтому, в статье справедливо указаны требования, предъявляемые к полимерам. Представлены марки древесностружечных плит, которые могут быть подвержены термосилового воздействия и их полный обзор. В статье раскрыто понятие шероховатость плит, которая существенным образом влияет на износ и трение обрабатывающего инструмента. При этом сделан вывод, что физико-механические характеристики древесностружечных плит для мебельного производства достаточно изучены, шероховатость которых не должна превышать 500 мкм. Представлена теория перехода работы в тепловую энергию, а также влияние температуры плиты на физико-химические свойства древесностружечной плиты. Также в статье представлена методика расчета динамических и кинематических характеристик термодетяжного узла обрабатывающего инструмента для достижения оптимальных значений шероховатости древесностружечной плиты, с целью уменьшения расхода материала под ламинирование и существенного улучшения качества древесностружечных плит.

Ключевые слова: древесно-стружечная плита, шероховатость, узел трения, износ инструмента, фрикционный материал, адгезия.

Conifers of the boreal area. 2023, Vol. XLI, No. 2, P. 185–193

STUDY OF THE INFLUENCE OF THE FRICTION FORCE ON THE SURFACE ROUGHNESS OF WOOD PARTICLE BOARDS AND ON TOOL DETERIORATION

P. V. Tsaplin, V. G. Mezhev, A. V. Kustov, E. A. Zabolotskaya, Ya. S. Goncharova

Reshetnev Siberian State University of Science and Technology
31, Krasnoyarskii rabochii prospekt, Krasnoyarsk, 660037, Russian Federation
E-mail: tsaplinpv@sibsau.ru

The article examines the problem of the influence of the physical characteristics of particle boards on the friction of the processing tool and its deterioration. The method of applying the thermal force to the surface of particle boards while processing for furniture production is an innovative method that eliminates the main disadvantages of processing with sanding belts, namely: the formation of non-recyclable production waste, waviness, surface woolliness, high power consumption. The method of applying the thermal force and, in particular, the effect of friction and heating temperature on the processing tool requires more detailed consideration. One of the key physical characteristics of particle boards is roughness, which significantly affects deterioration. The frictional properties of the material of the processing tool and their influence on temperature indicators are examined. The particle board as a polymer is deformed under the action of external load and temperature. Therefore, the article objectively defines the requirements for polymers.

The brands of particle boards which can be subjected to thermal power processing and their full review are presented. The article reveals the concept of the particle board roughness, which significantly affects the deterioration and friction force of the processing tool. Moreover, it was concluded that physical and mechanical characteristics of particle boards, the roughness of which should not exceed 500 micrometer, have already been sufficiently studied. The theory of the transformation of work into thermal energy as well as the influence of the temperature of the board on the physicochemical properties of the particle boards is presented. The article also presents a method for calculating the dynamic and kinematic characteristics of the thermo-drawing unit of the processing tool used to achieve optimal values of the particle board roughness, and to reduce material consumption for lamination and significantly improve the quality of particle boards.

Keywords: particle board, roughness, friction unit, tool deterioration, friction material, adhesion.

Согласно ГОСТ 11368–89 Массы древесные прессовочные – это древесные массы горячего прессования из сырьевых отходов древесины, пропитанных растворами резольных фенолформальдегидных смол или их модификаций, поставляемых химической промышленностью [1]. Эти химические соединения представляют связующие вещество, способное связывать частицы древесной композитной плиты. Молекулы связующего построены из множества, многократно повторяющихся одинаковых структурных частиц (звеньев), соединённых между собой химическими связями. Большая молекула, составленная из таких звеньев, называется макромолекулой. Вещества, имеющие число повторяющихся звеньев, называются высокополимерными, или полимерами. Все полимеры находятся либо в жидком, либо в твердом агрегатном состоянии и никогда – в газообразном. Связующее вещество состоит из одного полимера или из полимера и отвердителя (катализатора), иногда с некоторыми добавками (стабилизаторами, пластификаторами, красителями). Связующие относятся к классу термореактивных полимеров. Полимер, как основное вещество, входит в состав клея. Клеи, по составу простые или сложные композиты, способны за счёт сил адгезии в определённых условиях соединить однородные или неоднородные материалы. Клеи по природе бывают животного, растительного, минерального и синтетического происхождения. Кроме полимерного вещества в состав клеев входят различные растворители для понижения или повышения вязкости и увеличения жизнеспособности, пластификаторы для уменьшения хрупкости, отвердители (катализаторы) и т.д.

С 20-х годов XX века в промышленности стали применять синтетические полимеры, вытеснив природные полимерные вещества. В производстве древесных композитных плит распространены полимеры поликонденсационного типа; в качестве связующего применяются в основном карбаминоформальдегидные или фенолформальдегидные смоляные клеи. Из-за состава связующего древесную композитную плиту можно отнести к классу термореактивных полимеров.

Общие требования к полимерам – доступность, простота, дешевизна, стабильность, не токсичность, растворимость, адгезионная и когезионная прочность, водостойкость, термостойкость.

В данном исследовании древесные композитные плиты представлены древесностружечными, так как в основе их лежит древесная стружка. Официальная аббревиатура древесностружечной плиты ДСтП (далее – ДСтП, плита).

ДСтП представляет собой листовой большеформатный высокопористый материал небольшой толщины – от 10 до 25 мм, состоящий из двух компонентов – древесных частиц и связующего. С учётом доли связующего в плите «п» и доли древесины (1–п) пористость определяется из уравнения [2]:

$$П = [1 - \gamma_{пл} - (1 - n/1,54 + h/\gamma_{св})] 100 \%, \quad (1)$$

где $\gamma_{пл}$, $\gamma_{св}$ – соответственно плотность плиты и связующего, г/см³; h – глубина внедрения, мкм; 1,54 – плотность древесного вещества, г/см³.

В зависимости от типа плиты пористость может быть в пределах от 10 до 30 %. При анализе поперечного сечения плит, образованных клеевым каркасом и наполнителем из древесной массы слоёв волокон, стягивающие каркас увеличивают объём пор до 50 % от общего занимаемого объёма плиты [3; 4; 5].

Марки и обозначения плит:

- P-1 многослойные P-1M
- трехслойные P-1T
- P-2 трёхслойные P-2T
- однослойные П-20
- P-3 трёхслойные P-3T

Имеются классы 1–12 и группы А, Б, В, С, Д обозначений плит.

В наших исследованиях использовался образец плиты P-2T (плита второй марки, трёхслойная).

В технологии изготовления древесных прессованных плит большое значение имеют исследования физико-механических их свойств, различные показатели, заложенные в технических требованиях ГОСТов. Приведены ГОСТ 10632–77, нормирующий основные физико-механические свойства плит и ГОСТ 7016–2007 «Древесина. Шероховатость поверхности». В ГОСТах приведены требования к физико-механическим свойствам плит, такие как:

– влажность (8 %±2 %) – $w = 100 (m_1 - m_0) / m_0$, где m_1 и m_0 соответственно начальная масса и масса в абсолютно сухом состоянии;

– водопоглощение – способность образцов плит поглощать воду при полном погружении в неё на 24 часа $\delta w (\%) = 100 (m_1 - m) / m$, где массы m и m_1 соответственно до погружения и после;

– разбухание – при повышенной водостойкости – 5–25 %, при обычной – 20–30 %. $\Delta h = 100(h_1 - h) / h$, где h и h_1 – толщина образцов соответственно до и после увлажнения, м(см);

– предел прочности при растяжении перпендикулярно пласти (в зависимости от марок и групп плит 0,295–0,392 МПа);

- предел прочности при статическом изгибе (в зависимости от марок и групп плит и толщины их 13,37 – 24,51 МПа);
- твёрдость (только для плит марок П-3 – не менее 29,4 МПа);
- плотность (в зависимости от марок плит 550–850 кг/м³);
- шероховатость поверхности (нормируется отдельно для шлифованных, в зависимости от марок и групп, 80–32 мкм, для нешлифованных, в зависимости от марок и групп, 320–500 мкм), а для шлифованных плит Р-1 и Р-2 группы А в стандарт введены нормы, необходимые для плит со Знаком качества – 60 мкм.

По качеству поверхности шлифованные плиты делятся на плиты со Знаком качества, I и II сортов, нешлифованные плиты – на плиты I и II сортов. Сортность плит определяется по наличию дефектов (углубления, выступы, царапины и т. д.), что в плитах, шлифованных со Знаком качества и I сорта не допускается.

Плиты Р-1 в настоящее время выпускаются только шлифованными, остальные двух марок (2 и 3) как шлифованными, так и нешлифованными. Физико-механические свойства марок плит Р-1 и Р-2 практически не различаются. Плиты марок 3 (Р-3) имеют повышенные показатели как по прочности, так и по свойству, определяющих их отношения к влаге, что связано со спецификой их использования в строительстве и в других подобных отраслях народного хозяйства. Плиты всех марок изготавливают с применением синтетических смол, согласно ГОСТ 10632–2007. Они не должны выделять в окружающую среду вредные химические вещества в количествах, превышающих допустимые нормы. По содержанию формальдегида плиты делятся на классы эмиссии: Е-1, Е-2, Е-3. Вышеприведённый ГОСТ соответствует Международной организации по стандартизации ИСО и разработанной его рекомендации ИСО Р 286 «Система допусков и посадок ИСО, допуски и отклонения».

Шероховатость поверхности ДСтП (рис. 1) – одна из составляющих качества при механической обработке плит. Шероховатость – чередование выступов и впадин, вследствие строения древесных материалов в процессе резания. Профиль поверхности изделия в поперечном сечении представляет собой волнообразную линию.

От шероховатости зависят припуски на механическую обработку в последующих операциях. Шероховатость поверхности существенно влияет на качества склеивания, облицовывания, экономические расходы лакокрасочных материалов. Показатели шероховатости деревообработки нормализованы ГОСТ 7016–(82) 2007 [6] «Древесина. Шероховатость поверхности. Параметры и характеристики». Стандарт устанавливает номенклатуру и числовые значения параметров шероховатости поверхности механически обработанных плит. Шероховатость поверхности плит характеризуется размерными показателями неровностей (риски, волнистость и т. д.) и наличием или отсутствием ворсистости и мшистости. Ворсистость (наличие отдельных не полностью отделенных волокон) не допускается, если числовое значение R_{Zmax} менее 8 мкм, или если параметр находится в пределах 16–20 мкм. Мшистость (наличие пучков волокон, отделённых не полностью) не допускается, если R_{Zmax} менее 100 мкм. Наиболее точно изображают процессы резания материала следующие параметры шероховатости: R_d (среднее арифметическое отклонение профиля в пределах базовой линии), R_m , R_z , S_z (средний шаг неровностей по впадинам), l – длина базовой линии (выбирается для выделения неровностей), H_{max} и R_{Zmax} (максимальная высота неровностей на поверхности от 0,05 до 80 мкм).

Таблица 1
Классы шероховатости R_{Zmax}

Класс	R_{Zmax} мкм, не более	Класс	R_{Zmax} мкм, не более
1	1600	7	100
2	1200	8	60
3	800	9	32
4	500	10	16
5	320	11	8
6	200	12	4

Оценка точности измерений шероховатости представлена как среднее значение максимальных высот неровностей (H_{max} сред.) определяемое формулой

$$R_{Zmax} = (H_{max1} + H_{max2} + \dots + H_{maxn}) / (n),$$

$$R_{Mmax} = 1/n \sum H_{maxi}, \quad (2)$$

где H_{maxi} – расстояние от высшей до низшей i -й неровности, мкм; n – число измерений.

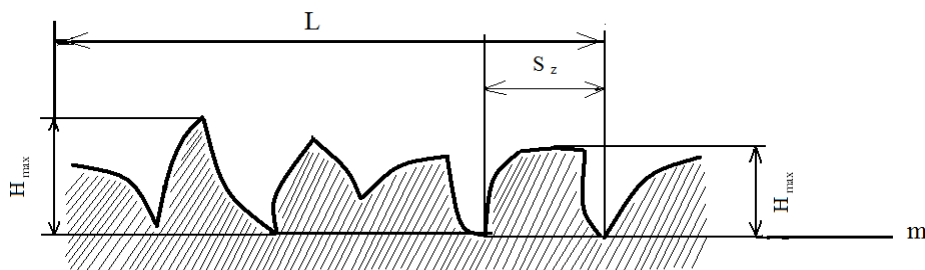


Рис. 1. Основные характеристики шероховатости

Средняя ошибка одного измерения (m) определяется по формуле

$$m = \pm \sqrt{\sum \delta^2 / (n-1)}. \quad (3)$$

где $\delta = H_{\text{imax}} - H_{\text{max ср}}$ – отклонение от среднего арифметического.

Можно заключить, что физико-механические характеристики ДСтП для мебельной промышленности достаточно изучены, шероховатость плит не должна превышать 500 мкм. Поэтому с ростом потребностей в качественной продукции требуются внедрения в обработке ДСтП новых технологий и совершенствование оборудования.

Гильом Амонтон в математическом виде вывел закон о прямой пропорциональности между прижимающей силой одного тела к другому (N) и силой трения (F):

$$F = f \times N, \quad (4)$$

где f – коэффициент трения.

По формуле (4) сила трения F прямо пропорциональна сжимающему весу N и не зависит от сопротивления двух тел и координат одного тела относительно другого, а зависит от относительной скорости двух тел.

Шарль Кулон, основоположник трибологии, проверив справедливость закона Амонтона, пришёл к зависимости:

$$F = f \times N + A, \quad (5)$$

где A – действие поверхностных атомно-молекулярных сил адгезии. Известно, что поверхность твёрдого тела, даже у хорошо отшлифованных гладких поверхностных материалов, обладает неровностями высотой 0,05–0,1 мкм, или размером в 100–1000 Å° (ангстрем).

В период с 1724–1734 гг. Д. Деагулье открыл явление адгезии (когезии), роль которой стало очевидно в XX веке, когда трибологи взялись за решение главной задачи трения: каким образом механическая энергия, подводимая к фрикционной паре, превращается в теплоту.

В конце XIX века на основе открытия о строении вещества появилась идея (Л. Брютлюэн) возможности рассеяния энергии в теплоту при последовательном разрыве и образовании адгезионных связей двух тел. Эту идею непрерывного обмена связей при трении скольжения развили советские учёные В. Кузнецов, Б. Дерягин, Г. Бартенёв и др. Но главным образом благодаря работам Ф. Боудена и Д. Тейбора в Англии и И. В. Крагельского в СССР стали учитывать не только зацепление и смятие неровностей на контакте, но и прилипание тел друг к другу и сформулировали теорию трения применительно к полимерам. Сила трения скольжения проявляется как сила сопротивления относительно перемещению контактирующих тел, не зависящую от величины перемещения. Физическая природа таких сил сложна и многообразна. Переход от трения покоя к трению скольжения происходит скачком, и движение тела с постоянной скоростью сопровождается постоянным сопротивлением этому перемещению. При этом практически всегда

сила трения скольжения ($F_{\text{ск}}$) меньше силы трения покоя ($F_{\text{п}}$), неполной силы трения $F_{\text{ск}} < F_{\text{пок}}$.

В 1939 г. советским учёным И. В. Крагельским была предложена молекулярно-механическая или адгезионно-деформационная теория трения, двойственная природа трения. Получила своё развитие новая отрасль технических знаний – учение о контактном взаимодействии твёрдых тел с учётом окружающей среды. Она доведена применительно к теории трения покоя до количественных зависимостей, хуже – с трением скольжения [7]. Касание твердых тел происходит не по всей поверхности, а в определённых пятнах («очагах») контакта. Фактическая (суммарная) площадь таких очагов меньше заданной (номинальной) площади и растёт с увеличением груза P [7]. Сила трения прямо пропорциональна фактической площади контакта, следовательно, она увеличивается с ростом груза P .

Существует и другая теория, диффузионная, как расширяющая молекулярную теорию, которая объясняет высокую адгезию одного и того же полимера (аутогезия), где нет условий для возникновения двойного электрического слоя, а есть явление диффузии концевых и срединных участков цепочечных молекул одного полимера в другой, чем объясняется их прочная связь. Известно, что у металлов носителями зарядов являются электроны, а в нашем случае у полимерных материалов могут быть и электроны, и ионы. Прочность химических связей намного превышает прочность межмолекулярных, чем обеспечиваются условия совместности однородных молекулярных и надмолекулярных структур, а также совместного действия внешних электрических и магнитных полей. Величина адгезии зависит от капиллярно-пористого строения материала, толщины лакокрасочной плёнки, состава материалов и когезии [7]. Сила трения в прямом отношении зависит от прочности адгезионной связи, зависит от геометрических характеристик истинной площади контакта. Для упрочнения адгезионной связи предпочтительнее пластическая деформация, так как при упругой деформации со снятием нагрузки связь разрушается. [8] Согласно Я. Е. Гегузину и Л. Н. Парицкой скорость протекания пластической деформации, пластическое состояние контактной зоны, более высокая температура для скорости построения атомов формируют контакт, контурную площадь трения.

Известно, что в основе трения лежит рассеяние энергии в микрообъёмах, возникающих в зонах касания двух твердых тел при их относительном скольжении, вызванного интенсивным обменом адгезионных связей. Это – природа трения. Причина трения в основном связана с адгезией, с формированием поверхностного слоя толщиной в пределах 10^{-2} до 10^{-4} см. Подтвердилось, что фундаментальной причиной трения служит не механическое деформирование дорожки, а адгезионный эффект в тончайших поверхностных граничных плёнок. Трибологами Боуденом и Тейбором было открыто наличие мостиков холодной сварки при трении твёрдых тел в атмосферных условиях; и как они полагали, трение в основном обусловлено сопротивлением на срез мостиков холодной сварки.

Объёмным деформированием твёрдых тел они пренебрегали, за исключением трения высокоэластичных тел, где, по их мнению, трение вызывается потерями на гистерезис. По мнению И. В. Крагельского не менее важным фактором, вызывающего трение, является объёмное деформирование материала. Суть в том, что и значение адгезии сводится к тому, что из-за образования адгезионных связей между плёнками твёрдых тел, вследствие изменения напряжённого состояния, увеличивается сопротивление объёмного деформирования и увеличивается сам объём. В этом полное объяснение природы и причины трения.

В настоящее время природа шероховатости и волнистости достаточно изучена и существенно является то обстоятельство, что под влиянием термонагрузок и вследствие неоднородности механических свойств поверхности шероховатость поверхности изменяется. При механическом контакте сжатия нагрузкой возникают упругие и пластические деформации, формируются пятна касания, представляющие собой фрикционные связи, поражающиеся совместным действием нормальных и тангенциальных сил. В результате трения образуются мостики сварки, которые продолжают существовать при снятии нормальной нагрузки. Пятна образуются, существуют, исчезают в зависимости от фрикционной связи. Поверхностные слои двух тел изменяются действием объёмного деформирования, происходит внедрение более жёстких элементов поверхности в более мягкие в тангенциальном направлении. Из результатов экспериментов И. В. Крагельского и Л. В. Есина установлена зависимость нарушения фрикционной связи от относительного внедрения единичной неровности h/R (h – глубина внедрения, R – радиус внедрившейся неровности) и относительной прочности адгезионной связи σ/σ_s (где σ – тангенциальное напряжение, кг/см^2 ; σ_s – нормальное напряжение, кг/см^2), возникшей между плёнками или самими телами, если плёнки удалены [7].

Фрикционный материал должен обладать устойчивым значением коэффициента трения, быть теплоустойчивым и не зависеть от давления и скорости. Фенолформальдегидная смола (связующее ДСтП) имеет высокую температуру разложения и, как скелет, уплотняется в плите, снижая после фрезерования разнотолщинность, снижает коэффициент трения при увеличении температуры, не снижая прочности ДСтП после термосиловой обработки. Существует три наиболее важных положения, являющихся базовой характеристикой фрикционного контакта:

- 1) адгезионно-фрикционная природа внешнего трения;
- 2) обязательное условие внешнего трения в правиле положительного градиента сдвигового сопротивления;
- 3) влияние шероховатости на возможность внешнего трения.

Внешнее трение твёрдых тел – сложное явление, зависящее от многих процессов, протекающих на границе раздела в зонах фактического контакта и в тонких поверхностных слоях этих тел при относительном тангенциальном их перемещении. Процесс деформирования можно считать внешним трением, когда

относительное перемещение твёрдых тел в тангенциальном направлении не нарушает однородность материала, а деформацией его ниже тонкого поверхностного слоя можно пренебречь. Общая сумма внешнего трения равна сумме двух составляющих, молекулярной (F_m) и деформационной (F_d):

$$F = F_m + F_d, \quad (6)$$

где F_d – для заданной шероховатости и удельной нагрузки вычисляется по формуле

$$F_d = 0,5 \Delta^{1/2} (P/P_2)^{1/4}, \quad (7)$$

где Δ – комплексная характеристика шероховатости, равная $\Delta = R_{\max} / r_b^{1/4}$; P – удельная нагрузка; P_2 – фактическое нормальное давление на пятне контакта;

В адгезионно-деформационной природе внешнего трения, коэффициент внешнего трения определяется формулой [9]:

$$f = +\beta + k\alpha\sqrt{h/R}, \quad (8)$$

где τ_0 и β – параметры уравнения, характеризующие сдвиговое сопротивление молекулярных связей (определяются экспериментально), в работе приводятся значения констант для ряда пар трения; P_f – фактическое давление; α_f – коэффициент гистерезисных потерь при объёмном деформировании, уменьшенное в 2,2 раза ($\alpha_f - 2,2 \alpha$); $k = 0,5$ – коэффициент, характеризующий форму неровностей и распределения их по высоте; h/R – относительное внедрение единичной неровности.

Для снижения трения скольжения ($F_{ск}$) до возможного минимума следует уменьшить энергию единичного объёма (модель Д. Томлинсона), равной слабой связи между атомами, примерно в 100 раз, до уровня порядка 10^{-3} , близкое к показателям «жидкостного» трения. Это возможно третьему телу, смазочной плёнке, создать также трение на поверхности контакта, предмету атомно-молекулярной инженерии.

При увеличении нормальной нагрузки (P_n) коэффициент внешнего трения может возрастать и уменьшаться. В общем случае при изменении P_n в широком диапазоне наблюдается прохождение f через минимум ($f_{\min}$). Шероховатость поверхности, составляющая $f_{\min}$ называется оптимальной. При анализе зависимости коэффициента трения от нормальной нагрузки правильной будет пользоваться не величиной нормальной нагрузки (P_n) а контурным давлением (P_k) так как одинаковым нормальным нагрузкам в зависимости от конструкции узла трения, соответствуют разные контурные давления. Из молекулярно-механической теории трения следует, что изменение коэффициента внешнего трения от контурного давления определяется видом деформаций в зонах фактического касания. При возрастании контурного давления при упругих деформациях в зонах контакта молекулярная составляющая коэффициента трения F_m уменьшается, а деформационный F_d – возрастает [9]. Поэтому изменение общего коэффициента внешнего трения при увеличении давления будет зависеть от соотношения между этими составляющими в значении коэффициента трения (8). Эти составляющие взаимно связаны

между собой и их арифметическое сложение при вычислении общей суммы можно использовать в первом приближении [9]. Деформационная составляющая определяется механическими свойствами трущихся тел, величиной положительной нагрузки и микротопографией поверхности (шероховатости) [9]. Таким образом, вопрос о взаимодействии между F_m и F_d сводится к выявлению соотношений между касательными и нормальными напряжениями для единичной фрикционной связи и является актуальным для дальнейшего развития теории трения [7].

Второе положение. Правилom положительного градиента сдвигового сопротивления для обеспечения внешнего трения, как обязательного условия, является формирование на поверхности твёрдого тела тонкой плёнки, нанесённой извне, или генерируемой самим трущимся телом с малым сдвиговым сопротивлением. Важным фактором при трении является различие между прочностью адгезионной связи и прочностью нижележащих слоёв. Если связь менее прочна, чем нижележащие слои, то имеет место положительный градиент механических свойств по глубине, т. е.

$$\frac{d\sigma_x}{dz} > 0, \quad (9)$$

где σ_x – разрушающее напряжение в направлении плоскости касания, z – координата, перпендикулярная к плоскости касания.

Если

$$\frac{d\sigma_x}{dz} < 0, \quad (10)$$

т. е. адгезионная связь прочнее нижележащих слоёв, градиент отрицателен и внешнее трение вообще невозможно.

Третье положение. Внешнее трение возможно в случае, если на трущихся поверхностях формируется шероховатость и невозможно для идеально гладких однородных поверхностей, так как не будет поступать окружающая среда, необходимая для формирования третьего тела. Невозможно внешнее трение и для очень шероховатых тел, поскольку вместо трения будет зацепление (реечный эффект). Наличие неровно-

стей на поверхностях твёрдых тел приводит к дискретному касанию и к высоким локальным давлениям, возникающим при соприкосновении высоких выступов. Эти давления мгновенно падают при выходе выступов из зацепления. Поэтому шероховатость должна иметь некоторое промежуточное значение относительно возможности внешнего трения.

Величина комплекса, соответствующая минимальному коэффициенту трения при неизменном контурном давлении, будет существенно зависеть от характеристик, определяющих работу узла трения, и механических характеристик менее жёсткого элемента трущейся пары. Получили формулу в зоне упругого насыщенного контакта для определения минимального коэффициента трения при одинаковых значениях τ_0 , $\alpha_{\text{эф}}$, μ и E , неизменных условиях работы узла трения, соответствующей оптимальной шероховатости поверхности более жёсткого элемента пары трения [10]:

$$f_{\min} = 1,5 [\tau_0^{1/2} \alpha_{\text{эф}}^{1/2} (1 - \mu^2)^{1/2} / E^{1/2}] + \beta, \quad (11)$$

где τ_0 – сдвиговое сопротивление при экстраполяции нормального давления к нулю; $\alpha_{\text{эф}}$ – коэффициент гистерезисных потерь; μ – коэффициент Пуассона; E – модуль упругости; β – коэффициент упрочнения молекулярной связи (безразмерный), фрикционная постоянная.

Следовательно, $f_{\min}$ для данного узла трения не зависит от величины приложенной нормальной нагрузки, ни от шероховатости поверхности, а определяется условиями работы пары трения. При упругом насыщенном контакте коэффициент внешнего трения зависит, как следует из данной формулы (12), от отношения $\tau_0 \alpha_{\text{эф}} (1 - \mu^2) / E$.

При пластических деформациях, в зонах фактического контакта молекулярная составляющая коэффициента внешнего трения от микротопографии поверхностей не зависит. Деформационная составляющая с увеличением комплекса Δ возрастает. Таким образом, при пластическом ненасыщенном контакте коэффициент внешнего трения с увеличением шероховатости поверхности возрастает. Изменение коэффициента трения в зависимости от Δ при различных P_c показано на рис. 2 [9].

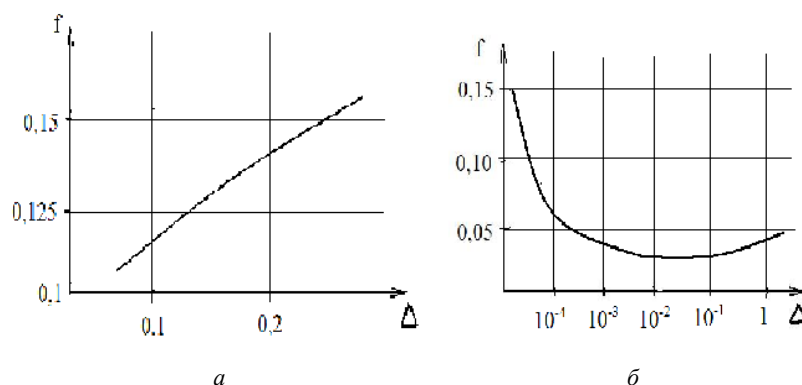


Рис. 2. Изменение коэффициента трения в зависимости от шероховатости поверхности при: а – ненасыщенном упругом контакте; б – ненасыщенном пластическом контакте

Работа силы трения (F) переходящей в тепло.

Снижение шероховатости – это износ поверхности ДСтП. В первом приближении работа силы трения термопротяжного узла преобразуется в теплоту в виде преобразования

$$A - Q$$

или

$$\frac{\lambda m}{l \Delta t} = 2\pi R_b k, \quad (12)$$

где λ – коэффициент теплопроводности обрабатываемого материала; m – масса материала; l – толщина материала; Δt – изменение температуры материала; R_b – радиус водила; k – число оборотов водила.

Нагрузка и температурный режим узла трения нарушают вид фрикционной связи, влияя глубиной внедрения (h/R) и относительной прочностью адгезионной связи. Нагрузка увеличивает глубину внедрения (h) и приводит к переходу от упругого контакта к пластическому деформированию и далее микрорезанию или задиру. Прочность адгезионной связи выражается зависимостью [7]:

$$\sigma = \sigma_0 + \beta P_r, \quad (13)$$

где σ_0 – прочность адгезионной связи при отсутствии нагрузки; β – коэффициент прочности молекулярной связи; P_r – фактическое давление на контакте.

Температура изменяет механические свойства материала и его поверхностных слоёв. При этом влияние скорости скольжения и скорости деформирования незначительное [11] у металлов. У полимеров (ДСтП) скорость деформирования влияет на механические свойства. Механизм разрушения материалов при трении связан с отгеснением материала внедрившемся контактом. Как показали экспериментальные исследования, при переходе от статического нагружения к ударному, сопротивление материалов разрушения возрастает лишь на 20–30 % и в редких случаях в 2–3 раза [7]. Под влиянием температуры у металлов образуется слой плёнки окисла или иного химического соединения пониженной прочности, необходимой для внешнего трения. Так от изменённых механических свойств материала и режима трения зависит вид нарушения фрикционных связей: высота и радиус кривизны (h , R) при вершине неровностей. Неровности могут моделироваться в виде сегментов асимметричных эллипсоидов, шара, а в единичных случаях – цилиндрическими сегментами. В условиях пластического контакта внешнее трение возможно лишь при незначительных внедрениях контактирующих неровностей, и поэтому расчётная модель представляет собой взаимодействие абсолютно жёстких сферических сегментов одинакового радиуса, расположенных на различной высоте с пластическим деформированным гладким полупространством, в форме шероховатости жёсткого контр тела. В условиях упругого контакта рассматриваются две модели: взаимодействие шероховатой поверхности (ДСтП) с гладкой (сталью) – жёсткое гладкое полупространство с упруго деформационными сферическими выступами, а взаимодействие двух шероховатых поверхностей – как взаимодей-

ствие упругих сферических моделей. И. В. Крагельский, Д. В. Конвисаров, П. А. Ребиндер внесли общие концепции на процесс износа. Все эти концепции позволяют учитывать, рассчитывать и влиять на механизм износа.

Методика расчёта динамических и кинематических характеристик термопротяжного узла для достижения оптимальной шероховатости ДСтП.

Теория теплопередачи – это учение о процессе распространения теплоты в пространстве с неоднородным полем температур. Существует три основных вида теплообмена: теплопроводность, конвекция и тепловое излучение. В данном случае происходит обмен энергией с молекулярным переносом теплоты движущейся стальной пластины с непосредственно соприкасающимся телом ДСтП. Такая теплопроводность в твёрдых телах с внедрившимися частицами осуществляется при условии невозможности возникновения конвективных токов и определяется тепловым движением микрочастиц стальной ленты. Передача теплоты теплопроводностью связана с наличием разности температур тел: стальной пластины и плиты ДСтП. Внутренний механизм теплопроводности объясним на основе молекулярно-кинетической теории: перенос энергии осуществляется вследствие теплового движения и энергетического взаимодействия между микрочастицами. В процессе термосилового воздействия происходит, нагрев поверхности протяжного термосилового механизма от силы трения $F_{тр}$, сопровождающийся теплопроводностью трущихся тел. Совокупность значений температуры для всех точек пространства в данный момент времени представляет температурное поле, которая в общем случае имеет вид

$$t = f(x, y, z, \tau), \quad (14)$$

где t – температура тела; x, y, z – координаты точки; τ – время.

Согласно закону сохранения энергии, выделенное количество тепловой энергии требуется для нагрева пластины до температуры необходимой для достижения минимума шероховатости поверхности ДСтП. Точки с одинаковой температурой в совокупности образуют изотермическую поверхность. Изменение температуры в теле наблюдается лишь в направлениях, пересекающих изотермические поверхности. Резкое изменение температуры получается в направлении нормали n к изотермической поверхности. Предел отношения изменения температуры Δt к расстоянию между изотермами по нормали Δn называется градиентом температуры:

$$\lim \left(\frac{\Delta t}{\Delta n} \right) = \frac{dt}{dn} \text{ grad } t = vt, \quad (15)$$

Если, нагрев взаимодействующих тел при трении происходит неравномерно по всему объёму, то при расчёте тепловой энергии требуется ввести градиент температуры.

Переход трения в теплоту осуществляется суммарной мощностью двигателя ($P_{дв}$) в составе следующих компонентов:

$$N_{\text{дв}} = N_{\text{води́ла}} (N_{\text{резания}} + N_{\text{трения}}) + N_{\text{подачт плиты}} + \\ + N_{\text{нагрев пластины}} + N_{\text{хол.ход}},$$

т. е.

$$N_{\text{дв}} = N_{\text{рез}} + N_{\text{тр}} + N_{\text{под}} + N_{\text{нагр}} + N_{\text{хол.ход}}, \quad (16)$$

$$N_{\text{рез}} = F_{\text{рез}} V_{\text{окр.фрез.}}$$

Сила резания $F_{\text{рез}}$ зависит от глубины резания h , удельного веса плиты γ и площади контакта S режущего инструмента с плитой, т. е.

$$F_{\text{рез}} = h \gamma S. \quad (17)$$

Линейная окружная скорость – равномерное движение по окружности с постоянной частотой вращения и в технике определяется числом оборотов в минуту, а поэтому

$$V_{\text{окр}} = \frac{\pi R n}{30}, \quad (18)$$

где R – радиус фрезы; n – число оборотов. Откуда

$$N_{\text{рез}} F_{\text{рез}} V_{\text{окр рез}} = \frac{h \gamma S \pi R n}{30}, \quad (19)$$

где γ – удельный вес плиты.

Дифференциал величины $S \gamma \pi R n h / 30$ равен произведению постоянной $S \gamma \pi R n / 30$ на переменную. Тогда

$$dN_{\text{рез}} = \frac{\gamma \pi R n S}{30} dh. \quad (20)$$

$P_{\text{тр}}$ равен произведению $F_{\text{тр}}$ на окружную линейную скорость, т. е.

$$N_{\text{тр}} = F_{\text{тр}} V_{\text{окр.}} \quad (21)$$

Согласно формуле (4) общая сумма внешнего трения равна сумме двух составляющих $F_{\text{мол}}$ и $F_{\text{деф}}$, в которой $F_{\text{деф}}$ для заданной шероховатости и удельной нагрузки равна по (5):

$$F_{\text{деф}} = 0,5 \Delta^{1/2} (P/P_r)^{1/4},$$

где P – удельная нагрузка; P_r – фактическое нормальное давление на контакт.

Отсюда

$$N_{\text{тр}} = \frac{\left[F_{\text{мол}} + 0,5 \Delta^{1/2} \left(\frac{P}{P_r} \right)^{1/4} \right] \pi R n}{30}. \quad (21)$$

Дифференциал $N_{\text{тр}}$ равен произведению постоянной $\pi R n / 30$ на дифференциал $F_{\text{тр}}$,

Далее дифференцируем $F_{\text{тр}}$ как сумму двух переменных:

$$dF_{\text{мол}} + d \left[0,5 \Delta^{1/2} \left(\frac{P}{P_r} \right)^{1/4} \right] = dF_{\text{мол}} + \frac{1}{2} \Delta^{-1/2} d\Delta + \\ + \frac{1}{4} \Delta^{1/2} \times \frac{1}{4} \left(\frac{P}{P_r} \right)^{-3/4} d \left(\frac{P}{P_r} \right) = \\ = dF_{\text{мол}} + \frac{1}{4} \left(\frac{P}{P_r} \right)^{1/4} \Delta^{-1/2} d\Delta + \frac{1}{8} \Delta^{1/2} \left(\frac{P}{P_r} \right)^{-3/4} \times$$

$$\times \frac{PrPrdP - PdPr}{P_r^2}.$$

$$dN_{\text{тр}} = V_{\text{окр}} dF_{\text{тр}} = \frac{\pi R n}{30} \left[dF_{\text{мол}} + \frac{1}{2} \Delta^{-1/2} d\Delta + \right. \\ \left. \times \left(\frac{P}{P_r} \right)^{1/4} \Delta^{1/2} \times \frac{1}{4} \left(\frac{P}{P_r} \right)^{-3/4} \times \right. \\ \left. \times d \left(\frac{P}{P_r} \right) \right] + \left[dF_{\text{мол}} + \frac{1}{4} \left(\frac{P}{P_r} \right)^{1/4} \Delta^{-1/2} d\Delta + \right. \\ \left. + \frac{1}{8} \Delta^{1/2} \left(\frac{P}{P_r} \right)^{-3/4} \times \left(\frac{PrPrdP - PdPr}{P_r^2} \right) \right]. \quad (22)$$

$$N_{\text{под}} = V_{\text{под}} (\text{const}) (F_{\text{рез}} + F_{\text{тр}}) = \\ = V_{\text{пол}} (\gamma h S + F_{\text{мол}} + F_{\text{деф}}). \quad (23)$$

$$dN_{\text{под}} = V_{\text{под}} (\gamma dh + dF_{\text{мол}} + \frac{1}{4} \left(\frac{P}{P_r} \right)^{1/4} \Delta^{-1/2} d\Delta + \\ + \frac{1}{8} \Delta^{1/2} \left(\frac{P}{P_r} \right)^{-3/4} \left(\frac{PrPrdP - PdPr}{P_r^2} \right)). \quad (24)$$

Расчёт мощности на нагрев пластины:

$$N_{\text{наг}} = F_{\text{тр}} V_{\text{окр}} = Q = \int q ds, \quad (25)$$

где Q – тепловой поток; q – удельное значение теплового потока; S – площадь пластины (const).

$$dN_{\text{наг}} = S dq. \quad (26)$$

Общий дифференциал мощности двигателя ($dN_{\text{дв}}$) в процессе калибрования термосиловым методом равен сумме дифференциалов мощностей резания, мощности трения, осуществляющего нагрев пластины и мощности подачи рабочих органов с учетом трения в кинематических узлах.

Суммарная функциональная мощность двигателя зависит от переменных: глубины резания (h), молекулярной составляющей силы трения ($F_{\text{мол}}$), неровности контактирующих поверхностей (Δ), нагрузки и давления на контакте (P , P_r), теплового потока (Q), силы тока (I) и напряжения на контакте (U). Механическая и электрическая энергия таким образом переходят в теплоту, изменяя параметры шероховатости пластины в процессе её механической обработки.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЕ ССЫЛКИ

1. ГОСТ 11368–89. Изделия из древесины и древесных материалов. Массы древесные прессовочные [Текст]. Взамен ГОСТ 11368–79, введ. 26.06.89. М. : Изд-во стандартов, 1990. 22 с.
2. Боровиков А. М., Уголев Б. Н. Справочник по древесине [Текст] / под ред. Б. Н. Уголева. М. : Лесная промышленность, 1989. 296 с.
3. Ермолович А. Г., Ереско С. П. Совершенствование процесса прессования строительных материалов, [Текст] : монография. Красноярск : СибГТУ, 2005, 150 с.

4. Пен Р. З. Планирование эксперимента в Statgraphics [Текст]. Красноярск : СибГТУ, 2003. 246 с.

5. Справочное руководство по древесине : пер. с англ. Л. П. Горелина, Т. В. Михайлова [Текст]. М. : Лесная промышленность, 1979. 554 с.

6. ГОСТ 7016–82. Изделия из древесины и древесных материалов. Параметры шероховатости поверхности [Текст]. Взамен ГОСТ 7016–75, введ. 01.07.83. М. : Изд-во стандартов, 1987. 5 с.

7. Крагельский И. В. Трение и износ [Текст]. М. : Машиностроение, 1968. 480 с.

8. Басин В. Г. Адгезионная прочность [Текст]. М. : Химия, 1981. 208 с.

9. Справочник по сушке древесины / под ред. Е. С. Богданова [Текст]. М. : Лесная промышленность, 1990. 304 с.

10. Соснин М. И., Климова М. И. Физические основы прессования древесностружечных плит [Текст]. Новосибирск : Наука, 1981. 190 с.

11. Кряжев Н. А. Фрезерование древесины [Текст]. М. : Лесная промышленность, 1979. 200 с.

REFERENCES

1. GOST 11368–89. Products from wood and wood materials. Wood pressing masses [Text]. Instead of GOST 11368–79, introduced. 06.26.89. M. : Publishing house of standards, 1990, 22 p.

2. Borovikov A. M., Ugolev B. N. Handbook of wood [Text] / ed. B. N. Ugolev. M. : Timber industry, 1989. 296 s.

3. Ermolovich A. G., Eresko S. P. Improving the process of pressing building materials [Text] : monograph. Krasnoyarsk : SibGTU, 2005, 150 p.

4. Pen R. Z. Planning an experiment in Statgraphics [Text]. Krasnoyarsk : SibGTU, 2003. 246 p.

5. Reference guide to wood : translated from english L. P. Gorelina, T. V. Mikhailov [Text]. M. : Forestry industry, 1979, 554 p.

6. GOST 7016–82. Products from wood and wood materials. Surface roughness parameters [Text]. Instead of GOST 7016–75, introduced. 07.01.83. M. : Publishing house of standards, 1987, 5 p.

7. Kragelsky I. V. Friction and wear [Text]. M. : Mashinostroenie, 1968, 480 p.

8. Basin V. G. Adhesion strength [Text]. M. : Chemistry, 1981. 208 p.

9. Handbook of wood drying / ed. E. S. Bogdanov [Text]. M. : Forestry industry, 1990, 304 p.

10. Sosnin M. I., Klimov M. I. Physical bases of chipboard pressing [Text]. Novosibirsk : Science, 1981, 190 p.

11. Kryazhev N. A. Wood milling [Text]. M. : Forestry industry, 1979, 200 p.

© Цаплин П. В., Межов В. Г., Кустов А. В.,
Заболотская Е. А., Гончарова Я. С., 2023

Поступила в редакцию 05.02.2023

Принята к печати 04.04.2023