



УДК 674.055, 621.9.025.6

DOI: 10.37482/0536-1036-2021-4-162-172

**МОДЕЛИРОВАНИЕ ДИСКРЕТНЫХ КОНТАКТОВ
ТЕРМОДИНАМИЧЕСКОЙ СИСТЕМЫ ЭЛЕМЕНТОВ
СБОРНОЙ ДЕРЕВОРЕЖУЩЕЙ ФРЕЗЫ***Н.А. Капустина¹, инж.-конструктор; ResearcherID: [AAK-7733-2021](https://orcid.org/0000-0002-9770-771X),**ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-9770-771X>**В.И. Малыгин², д-р техн. наук, проф.; ResearcherID: [E-6054-2014](https://orcid.org/0000-0003-4268-5178),**ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-4268-5178>**В.И. Мелехов², д-р техн. наук, проф.; ResearcherID: [Q-1051-2019](https://orcid.org/0000-0002-2583-3012),**ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-2583-3012>**В.А. Слуцков², аспирант; ResearcherID: [P-7597-2019](https://orcid.org/0000-0003-4032-4635),**ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-4032-4635>*¹ПКБ «Севмаш», Архангельское шоссе, д. 58, г. Северодвинск, Архангельская обл., Россия, 164500; e-mail: n.a.kapustina@inbox.ru²Северный (Арктический) федеральный университет им. М.В. Ломоносова, г. Архангельск, Россия, 163002; e-mail: vladimir.malygin@yandex.ru

Аннотация. Работоспособность сборного дереворежущего инструмента зависит кроме многих факторов от особенностей конструкции узла крепления режущего элемента. Для выбора сборного дереворежущего инструмента, который соответствовал бы требованиям производства, не существует четких критериев, раскрывающих основные влияющие на стойкость факторы. Моделирование термодинамических процессов в условиях контактного взаимодействия элементов дает возможность выбора конструкции для эффективного применения и повышения стойкости устройства. Цель исследования – моделирование термодинамических процессов в узле крепления режущего элемента в корпусе сборного дереворежущего инструмента для оптимизации его конструктивных и технологических параметров, а также режимов работы. Предметом исследования являются условия контактного взаимодействия и теплообменные процессы между элементами устройства. Сконструирован узел крепления режущего элемента и разработана модель взаимодействия частей механизма сборного дереворежущего инструмента. Дальнейшие задачи: построение модели термодинамических процессов в узле крепления режущего элемента; вывод рекомендации по выбору конструкции сборного дереворежущего инструмента на стадии проектирования – реализованы в работе, продолжающей проводимое исследование. На основе стандартного исполнения дереворежущей цилиндрической насадной фрезы была создана конечно-элементная модель контактного взаимодействия шероховатых волнистых поверхностей частей конструкции. Сделаны выводы о возможности дальнейшего аналитического моделирования контактных условий при имеющихся параметрах. С учетом данных конструирования и полученных показателей сил резания древесины определены сближения контактирующих поверхностей и радиусы единичных площадок касания. Методология и методы включают теоретическое исследование и математическое моделирование, в т. ч. конечно-элементный анализ. Полученные модели могут быть использованы в создании комплексной стойкостной схемы дереворежущего инструмента с учетом других факторов. Основным результатом данного этапа работы является получение модели контактных условий и исходных данных для дальнейшего моделирования

термодинамических процессов в узле крепления ножа в корпусе дереворежущей фрезы для прогнозирования его теплового состояния.

Для цитирования: Капустина Н.А., Малыгин В.И., Мелехов В.И., Слудков В.А. Моделирование дискретных контактов термодинамической системы элементов сборной дереворежущей фрезы // Изв. вузов. Лесн. журн. 2021. № 4. С.162–172. DOI: 10.37482/0536-1036-2021-4-162-172

Ключевые слова: узел крепления, режущий элемент, термодинамические процессы, контактное взаимодействие, сборная дереворежущая фреза, дискретный контакт.

Введение

Отсутствие комплексно обоснованных методик для выбора конструкции сборного инструмента с учетом в первую очередь теплового состояния узла крепления режущего элемента, а также конкретных требований по эффективной эксплуатации инструмента в условиях производства: повышения качества обрабатываемой поверхности и производительности ее работы, совершенствования режимов резания, поддержания стабильности технологических процессов – обосновывает актуальность проводимого исследования. В связи со сложностью постановки тепловой задачи для ее схематизации инструмент для фрезерования древесины рассматривается как малотеплопроводный материал.

На данный момент существует множество конструктивных исполнений узла крепления режущего элемента в корпусе сборной дереворежущей фрезы, при этом основополагающими принципами проектирования являются надежность, удобство крепления, экономичность [3, 11, 13].

Конструктивные особенности узла крепления влияют на теплоотвод, температурные и механические напряжения, износ инструмента [8, 14]. Это определяется термической проводимостью, которая зависит от реальной площади дискретного контакта между элементами конструкции [4, 9, 15, 21]. Вследствие большого числа факторов, оказывающих влияние на теплообразование в режущем клине и теплообмен в зоне контакта режущего элемента и опорной поверхности паза корпуса инструмента, изучаемый вопрос раскрыт недостаточно, на что указывают работы [10, 12].

Целью всего исследования, результаты которого будут отражены в этой и следующей статьях, является определение влияния конструктивных, технологических и эксплуатационных характеристик сборного дереворежущего инструмента на тепловое состояние режущего элемента и теплоотвод, а также вывод рекомендаций для выбора конструкции.

Целью изучения контактных условий стало получение исходных данных для последующего моделирования термодинамических процессов.

Объекты и методы исследования

В качестве объекта исследования принята конструкция сборной дереворежущей цилиндрической насадной фрезы. Предметом являются контактные условия в узле крепления ножа в ее корпусе. Моделирование термодинамических процессов при определенных контактных условиях даст возможность прогнозировать тепловое состояние режущего элемента и интенсивность теплообмена между частями конструкции.

План исследования отражен в алгоритме (рис. 1) и представляет собой постепенное приближение к созданию и анализу модели термодинамических процессов в узле крепления. Алгоритм имеет обратные связи, поэтому было проведено несколько циклов расчетов для выбора оптимальных конструктивных и технологических параметров, режима работы фрезы.

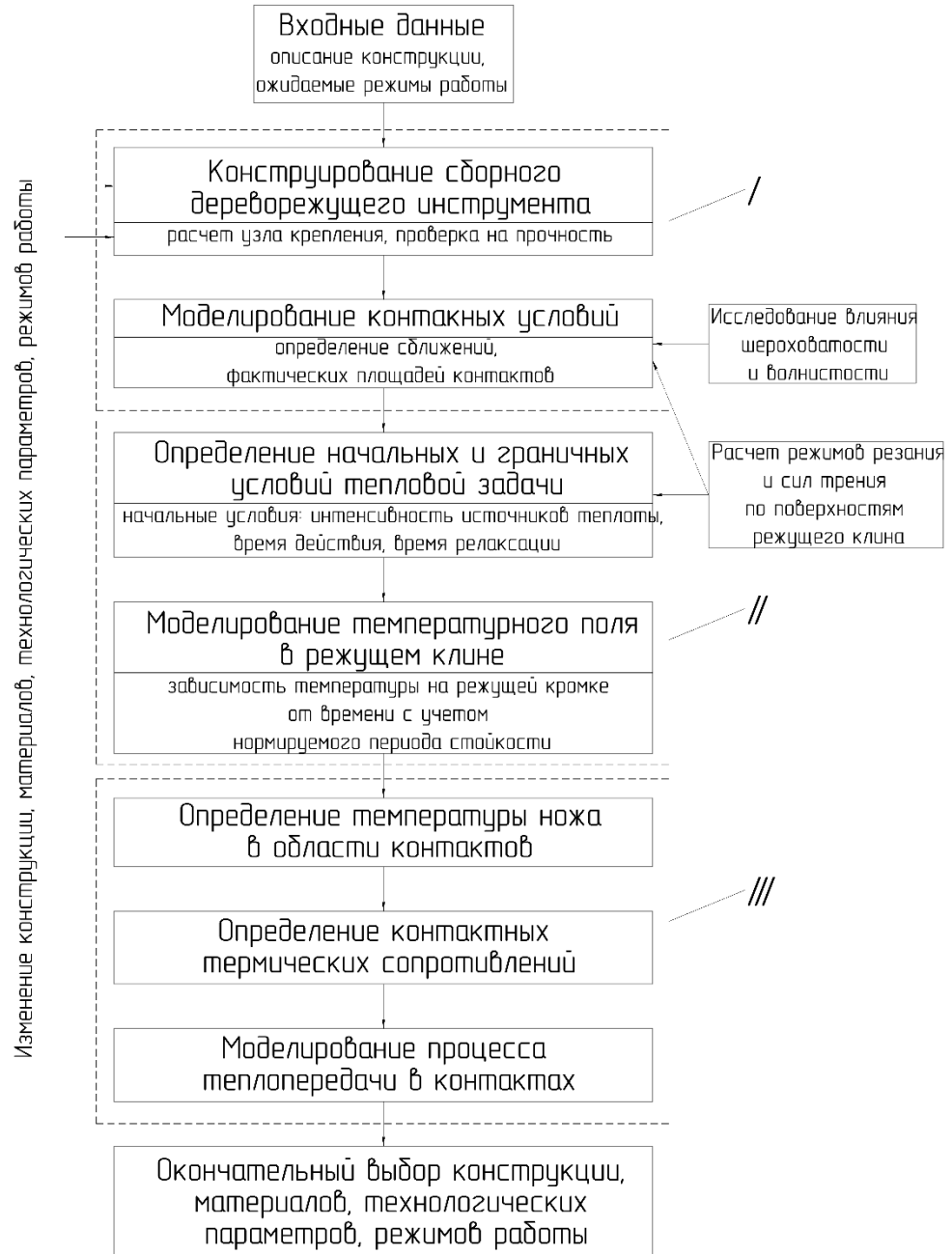


Рис.1. Алгоритм проведения исследования

Fig. 1. Algorithm of the research

Использованы методы математического (аналитического и конечных элементов) моделирования. При нелинейности контактных условий как наилучший вариант выбрано решение на основе программно-числового моделирования процессов. Начальными характеристиками являлись величины, полученные путем аналитического моделирования, и нормируемые параметры шероховатости и волнистости соприкасающихся поверхностей.

Состав программно-технических средств следующий: системы автоматизированного проектирования, использованные для твердотельного моделирования – «Компас-3D», Solidworks, для вычислений – MS Excel, программный комплекс конечно-элементного анализа AnsysWB, позволяющий создавать имитационные модели.

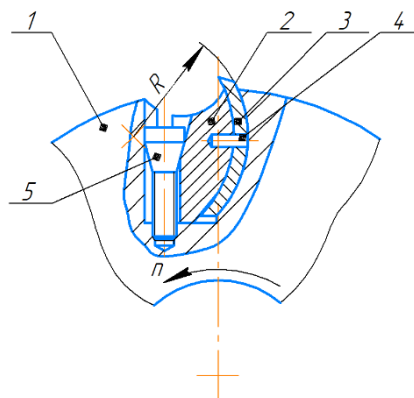
Входными данными для конструирования корпуса фрезы являлись материалы [11]. Цель разработки подобного механизма состояла в уменьшении габаритов существующей конструкции, экономии инструментального материала, повышении технологичности и надежности закрепления ножа, снижении финансовых и временных затрат при подготовке и обслуживании устройства, увеличении производительности механической обработки древесины.

Результаты исследования и их обсуждение

Проведение I этапа исследования (рис. 1). В процессе конструирования были разработаны узел крепления ножа, корпус фрезы и клин, подобраны радиальные винты и рассчитано их количество, необходимое для надежной фиксации. В вычислениях использованы стандартные методы, применяемые в практике конструирования изделий машиностроения [1]. Устройство узла крепления показано на рис. 2.

Рис. 2. Конструкция узла крепления ножа в корпусе фрезы: 1 – корпус; 2 – клин; 3 – нож; 4 – штифт; 5 – винт

Fig. 2. Design of the knife fastening unit in the milling body: 1 – body; 2 – wedge; 3 – knife; 4 – pin; 5 – screw



Анализ влияния параметров поверхностного слоя на эксплуатационные характеристики корпуса фрезы, такие как фреттинг-коррозия, усталостная прочность, контактная жесткость и плотность соединения, показал, что поверхностный слой детали должен иметь среднежесткий и жесткий опорные профили. Это достигается при обработке поверхностей резанием.

Важным для дальнейшего моделирования контактных условий являлось наличие покрытия: для корпуса фрезы, клина и винтов применяется защитное покрытие по ГОСТ 9.301–86 – химическое оксидирование с промасливанием. Толщина покрытия не нормируется, шероховатость не изменяется.

Антикоррозионные свойства, особенно сопротивление фреттинг-коррозии, что важно при работе сопряженных поверхностей, приобретаются после промасливания.

По результатам конструирования проведена проверка прочности корпуса и клина дереворежущей фрезы под действием испытательных нагрузок (согласно ГОСТ 13932–80) в программном САЕ комплексе AnsysWB.

По завершении I этапа выполнялись все шаги, показанные в алгоритме на рис. 1, вплоть до выявления необходимости вносить коррективы в конструкцию: подбор материалов, технологических параметров и режимов работы режущего инструмента. Так, для рассматриваемого варианта дереворежущей фрезы изменяли количество ножей, способ крепления, материал клина, мощность шпинделя станка, частоту вращения, скорость подачи до достижения оптимального сочетания параметров. Перспективным является рассмотрение модели взаимодействия этих характеристик и раскрытие механизма получения наиболее подходящего варианта, однако это не было изначальной целью проводимой работы и описывается только в качестве результатов.

Окончательные условия эксплуатации и материалы конструкции сборной фрезы следующие: мощность шпинделя станка $N = 7,5–9$ кВт; частота вращения $n = 8000$ мин⁻¹; материал клина – алюминий термоупрочненный В95, ГОСТ Р 51834–2001; материал корпуса – сталь 40Х, ГОСТ 4543–2016; материал ножей – сталь 8Х6НФТ (Х6ВФ), ГОСТ 5950–2000; обрабатываемая поверхность – плоскость (плоское продольное фрезерование); угол заточки – 45°; глубина резания $t = 3$ мм; обрабатываемый материал – береза, влажность $W = 12$ %; ширина фрезерования $b = 60$ мм; число ножей $z = 7$; диаметр $D = 125$ мм (в сборе с ножами); угол резания $\delta = 60^\circ$; время работы $T_{\text{раб}} = 60$ мин; скорость подачи $v_s = 60$ м/мин.

Чертеж корпуса представлен на рис. 3.

Механические характеристики материалов деталей в составе узла крепления в состоянии после термообработки и покрытия, которые являются исходными для моделирования контактных условий, приведены в табл. 1.

Таблица 1

Механические характеристики материалов деталей в составе узла крепления

Параметр	Нож	Корпус	Клин
Материал	8Х6НФТ	40Х	В95
Твердость HB	545	260	150
Коэффициент Пуассона μ	0,25	0,26	0,34
Модуль упругости, $E \cdot 10^{-5}$, МПа	2,07	2,14	0,74
Предел текучести σ_T , МПа	1860	720	490

Для моделирования контактных условий проведено исследование влияния шероховатости и волнистости на формирование фактической площади дискретного контакта элементов конструкции дереворежущей фрезы (аналитическим методом и методом конечных элементов) [7]. Целью являлось определение характера деформаций и выбор соответствующих зависимостей для дальнейшего моделирования термодинамических процессов. При описании механических свойств материалов для проведения исследования в программном САЕ комплексе AnsysWB, постановке нелинейной задачи взаимодействия волнистых шероховатых поверхностей, определении режимов резания, которое

включало рассмотрение свойств обрабатываемой древесины, углов резания, кинематических характеристик, использованы данные [17–20]. Для достижения сходимости и устойчивости решений, получаемых в AnsysWB, применены рекомендации [16].

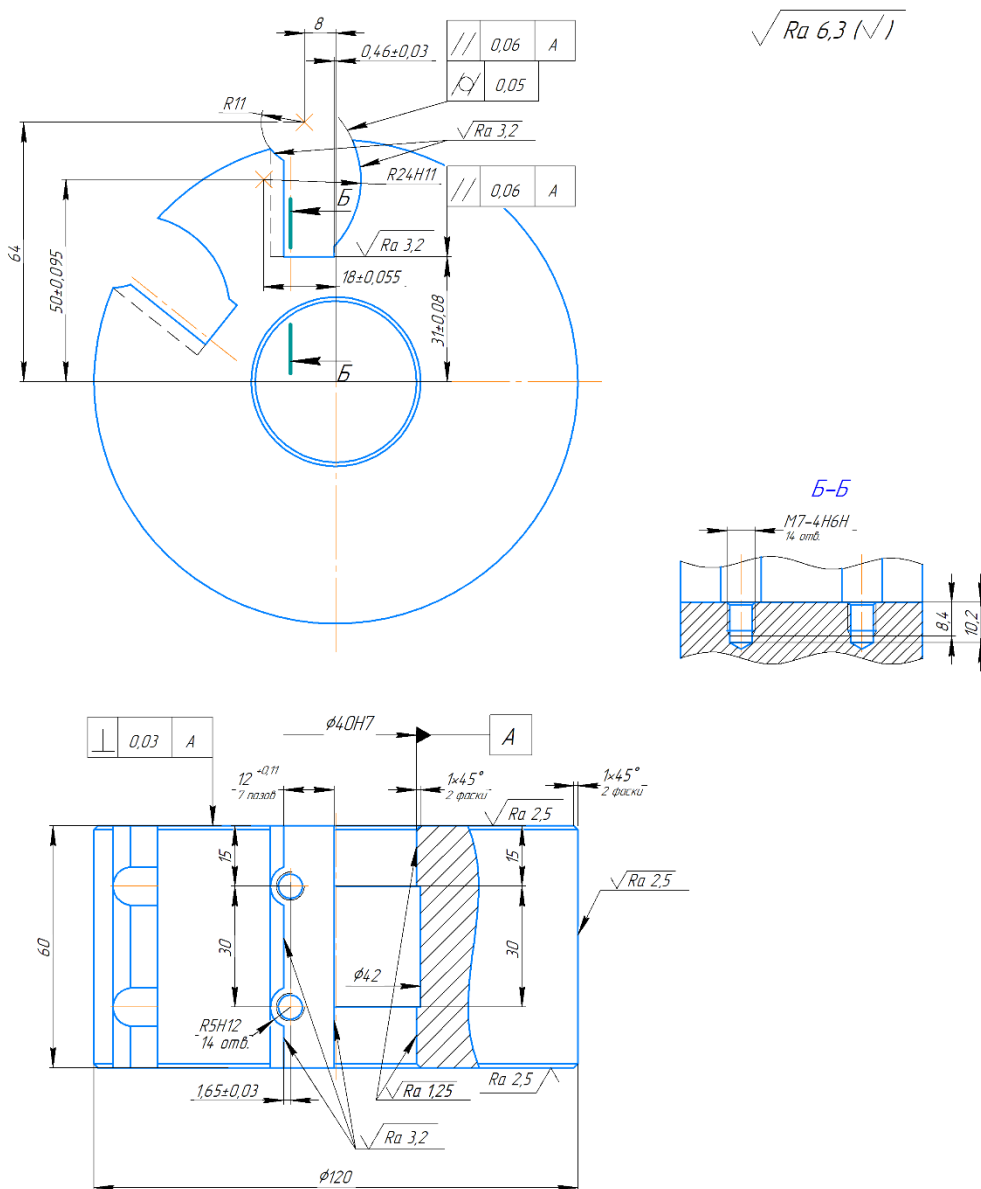


Рис. 3. Чертеж корпуса дереворежущей цилиндрической сборной фрезы
 Fig. 3. Drawing of the modular shell-type plane wood-milling cutter body

На основании выводов [7] и исследований Измайлова В.В. [6] при проектировании дереворежущего инструмента были применены аналитические модели без трудоемкого имитационного моделирования. При таком описании контактных взаимодействий достаточно использовать сферическую модель выступов, которая дает удовлетворительные результаты и упрощает расчеты [4].

По данным табл. 1 между твердостью ножа HB_n и клина, ножа HB_n и корпуса HB_k наблюдается значительная разница. На основании этого при математическом описании использовался принцип эквивалентной поверхности: менее твердые описывались как эквивалентно шероховатые, наиболее твердая принималась гладкой.

Нормируемые параметры шероховатости, номинальные площадь контактов и давление на нож для дальнейшего определения сближений и фактических площадей контактов приведены в табл. 2. Номинальное давление рассчитано через усилие прижатия ножа клином и составляющие сил резания, определенные по методике Бершадского А.Л. [2].

Таблица 2

Данные для моделирования контактов поверхностей деталей в составе узла крепления

Параметр	Нож	Корпус	Клин
Среднеарифметическое отклонение профиля R_a , мкм	2,5	3,2	3,2
Высота сглаживания неровностей R_p , мкм	6,25	8,00	8,00
Средний шаг неровностей S_m , мкм	80		
Номинальная площадь контактирующих поверхностей A_a , мм ²	1340,4		
Номинальное давление на нож p_a , МПа	4,12		

Согласно подходу Демкина Н.Б. [4, 5], относительная площадь контакта гладкой и эквивалентно-шероховатой поверхностей определяется по формуле

$$\eta = \frac{\alpha^{\omega/v} t_m^{\omega/v} p_c}{K_2 B} \quad (1)$$

где α – коэффициент, характеризующий упругую осадку выступов, находится для значений твердости и отношения:

$$\frac{S_m}{R_z} = \frac{80}{10+16} \approx 3,$$

для пары «клин–нож» $\alpha_{кл} = 0,75$, для пары «корпус–нож» $\alpha_k = 0,67$ [4];

t_m – относительная опорная длина на уровне средней линии,

$$t_m = K_t t_{m1} t_{m2};$$

$$K_t = K_1 \frac{(R_{p1} + R_{p2})^{v_1+v_2}}{R_{p1}^{v_1} R_{p2}^{v_2}},$$

при параметрах распределения материала по высоте $v_1 = v_2 = 2$ для фрезерованных поверхностей [4], $K_1 = 0,16$;

$$K_t = 2,64; t_m = 0,66;$$

ω, B – коэффициенты, характеризующие контактные напряжения на выступах, зависящие от формы последних и свойств материала; при упруго-пластическом контакте принимаются как для пластического контакта, а влияние упругой деформации учитывается коэффициентом упругой осадки α ,

$$\omega = 0;$$

$$B = C \sigma_t,$$

C – коэффициент, зависящий от формы выступов поверхности, для сферической модели выступов $C = 2,8-3$ [4], в расчете принято $C = 3$;

p_c – контурное давление, МПа; поскольку в данном случае волнистость не оказывает влияние на фактическую площадь контакта, контурное давление равно номинальному [7]:

$$p_c = p_a;$$

K_2 – коэффициент, определяемый относительно характеристик опорной кривой; для пластического контакта при $\omega = 0$; $K_2 = 1$ [4].

В итоге преобразования формулы (1) получаем относительную площадь контакта:

$$\eta = \frac{p_a}{3\sigma_\tau}. \quad (2)$$

Сближение поверхностей под действием нагрузки рассчитывается по [4]:

$$\Delta = R_p \left(\frac{p_a}{\alpha K_2 t_m B} \right)^{\frac{1}{\nu + \omega}}. \quad (3)$$

После преобразования получаем выражение для определения сближения поверхностей с учетом имеющихся данных:

$$\Delta = R_p \left(\frac{p_a}{3\alpha t_m \sigma_\tau} \right)^{\frac{1}{\nu}}. \quad (4)$$

Радиус контактного пятна находится по [4]:

$$r = \sqrt{2\alpha R_m \Delta}, \quad (5)$$

где R_m – радиус скругления вершин неровностей эквивалентной поверхности, мкм,

$$R_m = 0,22 t_m \frac{S_m^2}{R_a}.$$

Результаты расчета приведены в табл. 3.

Таблица 3

Результаты расчета параметров контактов

Параметр	Контакт «клин–нож»	Контакт «корпус–нож»
Относительная фактическая площадь контакта η_i	0,00280	0,00191
Сближение поверхностей Δ_i , мкм	3,91	3,65
Радиус контактного пятна r_i , мкм	30,92	28,24

Полученные в результате расчетов характеристики контактов поверхностей в парах «клин–нож» и «нож–корпус» в совокупности с данными табл. 1 иллюстрируют природу дискретного контакта инженерных поверхностей. Относительная фактическая площадь контакта твердой условно гладкой поверхности ножа с менее твердой эквивалентно-шероховатой поверхностью клина больше относительной фактической площади контакта с поверхностью корпуса пропорционально отношению пределов текучести материалов корпуса и клина при равных усилиях прижатия. Для сферических моделей с учетом величины деформации выступов менее твердого материала клина в сравнении с материалом корпуса (по коэффициенту упругой осадки) при прочих равных условиях наблюдается большее сближение поверхностей и, как следствие, больший радиус контактного пятна.

Заключение

Проведенное ранее исследование влияния шероховатости и волнистости на фактическую площадь дискретного контакта элементов конструкции

дереворезающей фрезы позволило перейти к сферической модели выступов и применить аналитические методы при моделировании контактов. В работе получены их характеристики: относительная фактическая площадь, сближение поверхностей, радиус контактного пятна. Данные – результаты исследования – являются входными для определения термодинамических характеристик в процессе фрезерования древесины. Модели контактов дают возможность применения электротепловой аналогии для дальнейших теоретических разработок.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ / REFERENCES

1. *Анурьев В.И.* Справочник конструктора-машиностроителя: в 3 т. Т. 1. 8-е изд., перераб. и доп. / под ред. И.Н. Жестковой. М.: Машиностроение, 2001. 920 с.
Anur'yev V.I. *Handbook for Mechanical Design Engineer*. In 3 vol. Vol. 1. Ed. by I.N. Zhestkova. Moscow, Mashinostroyeniye Publ., 2001. 920 p.
2. *Бершадский А.Л., Цветкова Н.И.* Резание древесины. Минск: Вышейш. шк., 1975. 302 с.
Bershadskiy A.L., Tsvetkova N.I. *Wood-Cutting Process*. Minsk, Vysheyshaya shkola Publ., 1975. 302 p.
3. *Глебов И.Т., Неустроев Д.В.* Справочник по дереворезающему инструменту. Екатеринбург: Урал. гос. лесотехн. акад., 2000. 253 с.
Glebov I.T., Neustroyev D.V. *Handbook of Wood-Cutting Tool*. Yekaterinburg, UGLTA Publ., 2000. 253 p.
4. *Демкин Н.Б., Рыжов Э.В.* Качество поверхности и контакт деталей машин. М.: Машиностроение, 1981. 244 с.
Demkin N.B., Ryzhov E.V. *Surface Quality and Contact of Machine Parts*. Moscow, Mashinostroyeniye Publ., 1981. 244 p.
5. *Демкин Н.Б., Удалов С.В., Алексеев В.А., Измайлов В.В., Болотов А.Н.* Контакт шероховатых волнистых поверхностей с учетом взаимного влияния неровностей // Трение и износ. 2008. Т. 29, № 3. С. 231–237.
Demkin N.B., Udalov S.V., Alekseev V.A., Izmaylov V.V., Bolotov A.N. Contact of Rough Wavy Surfaces with Consideration of Mutual Effect of Asperities. *Treniye i iznos* [Friction and Wear], 2008, vol. 29, no. 3, pp. 231–237. DOI: <https://doi.org/10.3103/S1068366608030045>
6. *Измайлов В.В., Чаплыгин С.А.* Числовое и аналитическое моделирование дискретного контакта деталей машин // Интернет-журн. «Наукоедение». 2014. № 6(25).
Izmailov V.V., Chaplygin S.A. Numerical and Analytical Simulation of Machine Parts Discrete Contact. *Naukovedenie*, 2014, no. 6(25). DOI: <https://doi.org/10.15862/10TVN614>
7. *Капустина Н.А.* Определение контактных условий для моделирования термодинамических процессов в узле крепления ножа в корпусе фрезы // XLVII Ломоносовские чтения: сб. материалов региональной науч.-практ. конф. Архангельск: ИД САФУ, 2019. С. 128–133.
Kapustina N.A. Determination of Contact Conditions for Modeling of Thermodynamic Processes in the Knife Fastening Unit in the Milling Body. *XLVII Lomonosov Readings: Proceedings of the Regional Scientific and Practical Conference*. Arkhangelsk, NArFU Publ., 2019, pp. 128–133.
8. *Малыгин В.И.* Повышение эффективности режущих инструментов методами сложного неоднородного моделирования и неразрушающей активной экспресс-диагностики: дис. ... д-ра техн. наук. М., 1995. 346 с.
Malygin V.I. *Improving the Efficiency of Cutting Tools by the Methods of Complex Heterogeneous Modeling and Non-Destructive Active Express Diagnostics*: Dr. Eng. Sci. Diss. Moscow, 1995. 346 p.
9. *Малыгин В.И., Ануфриева А.Р.* Исследование влияния характеристик стыка на термомопротивление сборного инструмента // Научно-техн. сб. Архангельск, 1990. С. 64–70.

Malygin V.I., Anufriyeva A.R. Research of the Influence of Joint Characteristics on the Thermal Resistance of a Modular Cutting Tool. *Research and Technical Source Book*. Arkhangelsk, 1990, pp. 64–70.

10. Малыгин В.И., Лобанов Н.В., Кремлева Л.В. Методы оптимизации и оценка качества дереворежущих фрез при стендовом и математическом моделировании. 1. Алгоритм решения задачи оптимизации конструкции сборного инструмента при физическом и математическом моделировании // Изв. вузов. Лесн. журн. 2008. № 2. С. 61–71.

Malygin V.I., Lobanov N.V., Kremleva L.V. Methods of Optimization and Quality Rating of Wood Cutters under Bench and Mathematical Simulation. 1. Algorithm of Problem Solution on Optimization of Assembled Tool Structure under Physical and Mathematical Modeling. *Lesnoy Zhurnal* [Russian Forestry Journal], 2008, no. 2, pp. 61–71. URL: <http://lesnoizhurnal.ru/upload/iblock/810/81025e18e6677908380022096514573c.pdf>

11. Малыгин В.И., Кремлева Л.В., Лобанов Н.В., Мелехов В.И. Эволюция топологии сборных дереворежущих фрез // Изв. вузов. Лесн. журн. 2013. № 6. С. 73–85.

Malygin V.I., Kremleva L.V., Lobanov N.V., Melekhov V.I. Evolution of the Topological Structure of Wood-Milling Cutters. *Lesnoy Zhurnal* [Russian Forestry Journal], 2013, no. 6, pp. 73–85. URL: http://lesnoizhurnal.ru/upload/iblock/b29/mod_8_6_2013.pdf

12. Малышев В.И., Резников Л.А. Теплофизические аспекты процесса резания в трудах отечественных и американских ученых // Сб. науч. тр. SWorld. 2012. Т. 12, № 3. С. 73–80.

Malyshev V.I., Reznikov L.A. Thermophysical Aspects of Metal Cutting Process in Works of Russian and American Scientists. *Sbornik nauchnykh trudov SWorld*, 2012, vol. 12, no. 3, pp. 73–80.

13. Морозов В.Г. Дереворежущий инструмент: справочник. М.: Лесн. пром-сть, 1988. 339 с.

Morozov V.G. *Wood-Cutting Tool: Handbook*. Moscow, Lesnaya promyshlennost' Publ., 1988. 339 p.

14. Резников А.Н. Теплофизика процессов механической обработки материалов. М.: Машиностроение, 1981. 279 с.

Reznikov A.N. *Thermophysics of Mechanical Processing*. Moscow, Mashinostroyeniye Publ., 1981. 279 p.

15. Шлыков Ю.П., Ганин Е.А., Царевский С.Н. Контактное термическое сопротивление. М.: Энергия, 1977. 328 с.

Shlykov Yu.P., Ganin E.A., Tsarevskiy S.N. *Contact Thermal Resistance*. Moscow, Energiya Publ., 1977. 328 p.

16. Barrett P.R. *ANSYS Nonlinear Convergence Best Practices*. CAE Associates, 2012. 75 p.

17. Gao Y.-F., Bower A.F. Rough Surface Plasticity and Adhesion across Length Scales. *Nanomechanics of Materials and Structures*, 2006, pp. 277–287. DOI: https://doi.org/10.1007/1-4020-3951-4_27

18. Jackson R.L., Green I. On the Modeling of Elastic Contact between Rough Surfaces. *Tribology Transactions*, 2011, vol. 54, iss. 2, pp. 300–314. DOI: <https://doi.org/10.1080/10402004.2010.542277>

19. Marohnić T., Basan R., Franulović M. Evaluation of Methods for Estimation of Cyclic Stress-Strain Parameters from Monotonic Properties of Steels. *Metals*, 2017, vol. 7, iss. 1, art. 17. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2015.02.029>

20. McKenzie W.M. *Fundamental Analysis of the Wood-Cutting Process*. Doctoral Thesis. Ann Arbor, University of Michigan, 1961. 151 p.

21. Rachid Ch., Lebon Fr., Rosu I., Mohammed M. Numerical Study of the Surface Roughness, Thermal Conductivity of the Contact Materials and Interstitial Fluid Convection Coefficient Effect on the Thermal Contact Conductance. *Annales de Chimie - Science des Matériaux*, 2019, vol. 43, no. 4, pp. 265–271. DOI: <https://doi.org/10.18280/acsm.430410>

MODELING OF DISCRETE CONTACTS FOR THE THERMODYNAMIC ELEMENT SYSTEM OF A MODULAR WOOD-MILLING CUTTER

*Natalia A. Kapustina*¹, Design Engineer; ResearcherID: [AAK-7733-2021](https://orcid.org/0000-0002-9770-771X),

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-9770-771X>

*Vladimir I. Malygin*², Doctor of Engineering, Prof.; ResearcherID: [E-6054-2014](https://orcid.org/0000-0003-4268-5178),

ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-4268-5178>

*Vladimir I. Melekhov*², Doctor of Engineering, Prof.; ResearcherID: [Q-1051-2019](https://orcid.org/0000-0002-2583-3012),

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-2583-3012>

*Vladimir A. Slutskov*², Postgraduate Student; ResearcherID: [P-7597-2019](https://orcid.org/0000-0003-4032-4635),

ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-4032-4635>

¹Design Bureau “Sevmash”, Arkhangel’skoye shosse, 58, Severodvinsk, Arkhangelsk Region, 164500, Russian Federation; e-mail: n.a.kapustina@inbox.ru

²Northern (Arctic) Federal University named after M.V. Lomonosov, Naberzhnaya Severnoy Dviny, 17, Arkhangelsk, 163002, Russian Federation; e-mail: vladimir.malygin@yandex.ru

Abstract. Operational capability of a modular wood-cutting tool depends, besides many factors, on the design features of cutting element fastening unit. There are no clear and precise methods that explain major factors influencing tool durability for selecting the design of the modular wood-cutting tool, which would meet production requirements. Thermodynamics modeling under contact interaction of elements enables to choose a design for effective application and increases the tool efficient life. The research purpose is modeling of thermodynamic processes in the cutter element fastening unit in the wood-cutting tool body in order to optimize the design, technological parameters and operating modes of the tool. The research subject is the contact interaction conditions and heat transfer processes between the device elements. The cutting element fastening unit is designed and the model of interaction between the parts of the mechanism of the modular wood-milling tool is developed. Further tasks, namely, development of a model of thermodynamic processes in the cutting element fastening unit, discussion of the results and identifying the recommendations for choosing the design of the modular wood-cutting tool at the design stage were realized in a work that continues the ongoing research. The finite-element model of rough wavy surfaces contact interaction of design elements was developed on the basis of standard design of a shell-type plain wood-milling cutter. The analysis concluded that further analytical modeling of contact conditions with existing parameters is possible. The contacting surfaces approach and the radii of single contact areas were determined taking into account the data of design and calculation of wood cutting forces. These results will be used next in modeling of thermodynamic processes. Methodology and research methods comprise theoretical study and mathematical modeling, including finite-element analysis. The models developed are possible to be used in the creation of a complex durability model of the wood-cutting tool with regard to other factors. The main result of this research stage is obtaining the model of contact conditions and initial data for further modeling of thermodynamic processes in the knife fastening unit in the milling body to predict its thermal condition.

For citation: Kapustina N.A., Malygin V.I., Melekhov V.I., Slutskov V.A. Modeling of Discrete Contacts for the Thermodynamic Element System of a Modular Wood-Milling Cutter. *Lesnoy Zhurnal* [Russian Forestry Journal], 2021, no. 4, pp. 162–172. DOI: 10.37482/0536-1036-2021-4-162-172.

Keywords: fastening unit, cutting element, thermodynamic processes, contact interaction, modular wood-milling cutter, discrete contact.