

УДК 539.3

С. С. Щербаков, канд. физ.-мат. наук, Н. В. Псырков, О. А. Насань

КОМПЬЮТЕРНОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ПОВРЕЖДЕННОСТИ СИСТЕМЫ ПРИЖИМ–НОЖ–ОПОРА В ТРЕХМЕРНОЙ ПОСТАНОВКЕ

Для многокомпонентной системы прижим–нож–опора режущего барабана комбайна сформулирована постановка контактной задачи с учетом взаимовлияния контактного взаимодействия и объемного деформирования. Рассчитано напряженно-деформированное состояние системы с учетом свойств материала ножа и различной величины силы резания. Проведена оценка состояния пространственной поврежденности ножа из высокопрочного чугуна в области резания на основе модели деформируемого твердого тела с опасным объемом.

Ключевые слова: трибофатическая система, поврежденность, контактное взаимодействие, режущий инструмент, конечноэлементное моделирование.

Введение. Трибофатическая система нож–прижим–опора является одним из наиболее ответственных узлов режущего барабана комбайна КВК 8060 производства ПО «ГОМСЕЛЬМАШ». В данной системе реализуется как контактное взаимодействие с трением между ее компонентами, так и изгиб ножа вследствие резания зеленой массы.

В рамках работ по замещению импортных стальных ножей системы нож–прижим–опора отечественными, изготовленными из высокопрочного чугуна марки ВЧТГ, возникла необходимость оценки напряженно-деформированного состояния и состояния поврежденности системы.

Построение конечноэлементной модели с учетом контактного взаимодействия. Конечноэлементное моделирование системы нож–прижим–опора в трехмерной постановке в соответствии с рис. 1 проводилось в пакете ANSYS.

Опора жестко закреплена, т. е. на ее поверхности S^u заданы граничные условия первого типа; граничные условия второго типа заданы для k -го элемента системы (на режущей кромке ножа и в болтовых соединениях) на поверхностях S^σ распределением усилий \bar{F}_i^k

$$u_i = 0, \quad \sigma_{ij}^k l_j^k = \bar{F}_i^k, \quad (1)$$

где l_j^k – направляющие косинусы.

Взаимодействие двух тел (например, ножа и прижима) с учетом их механических и геометрических свойств описывается условиями контакта

$$\bar{u}_i^k \Big|_{S_{kl}^u} - \bar{u}_i^l \Big|_{S_{kl}^u} = \gamma_i^{k,l}, \quad i = 1, 2, 3; \quad l = 1..m; \quad (2)$$

$$\sigma_{nn}^k \Big|_{S_{kl}^\sigma} - \sigma_{nn}^l \Big|_{S_{kl}^\sigma} = 0, \quad \sigma_{n\tau}^k \Big|_{S_{kl}^\sigma} = \sigma_{n\tau}^l \Big|_{S_{kl}^\sigma} \leq f^{k,l} \sigma_{nn}, \quad (3)$$

где m – количество тел, контактирующих с k -й; $f^{k,l}$ – коэффициент трения между k и l телами.

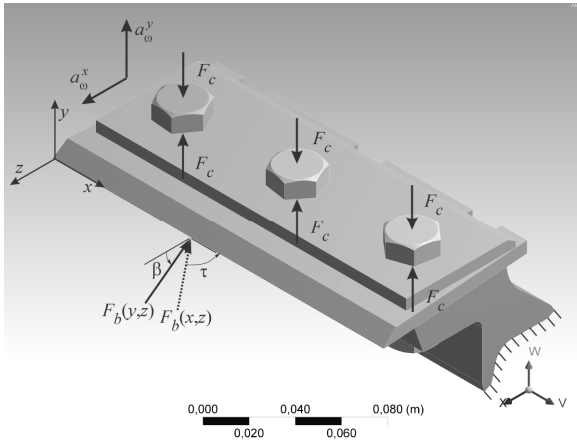


Рис. 1 – Трехмерная система прижим–нож–опора: схема нагружения, конечноэлементное разбиение

Состояние поврежденности системы нож–прижим будем оценивать на основе модели деформируемого твердого тела с опасным объемом. Для этого рассмотрим матрицу (тензор) повреждающих напряжений [2, 4, 5, 7]

$$\psi_q = \sigma_q / \sigma_q^{(*\text{lim})}, \quad (4)$$

где σ и $\sigma_q^{(*\text{lim})}$ – действующие и предельные напряжения, $q \in \{ij, i, \text{int}, U, Um\}$.

Тогда опасный объем, в соответствии с [2, 4, 5, 7], имеет вид

$$V_q = \{ dV / \psi_q \geq 1, dV \subset V_k \}, \quad (5)$$

где V_k – рабочий объем тела.

Разбиение на конечные элементы (рис. 1) было выполнено таким образом, чтобы наибольшая плотность элементов была на лезвии ножа.

В расчетах принимались следующие параметры системы: модули упругости стали $E_s = 2 \cdot 10^{11}$, $\nu_s = 0,3$; чугуна $E_i = 1,65 \cdot 10^{11}$, $\nu_i = 0,28$; коэффициент

трения между сталью и сталью $f_{ss} = 0,2$; между сталью и чугуном $f_{si} = 0,3$, длина ножа $L = 0,202$ м.

Осевые усилия затяжки болтов рассчитываются, исходя из предела текучести их материала (стали) равного 450 МПа, в предположении, что при пластическом деформировании болтов напряжения, а следовательно, и осевые усилия, остаются практически неизменными:

$$F_c = 450 \text{ Па} \pi r^2 = 59729 \text{ Н} , \quad (1)$$

где r – радиус болта равный $6,5$ мм.

Напряженное состояние, контактное взаимодействие, поврежденность. Пространственное распределение интенсивности напряжений в системе прижим–нож–опора для чугунного ножа при $F_c = 59729$ Н и режущей нагрузки $F_b = 3295$ Н, приложенной посередине лезвия ножа ($l = 0,5 L$) под углами $\beta = 30^\circ$, $\tau = 15^\circ$, показано на рис. 2.

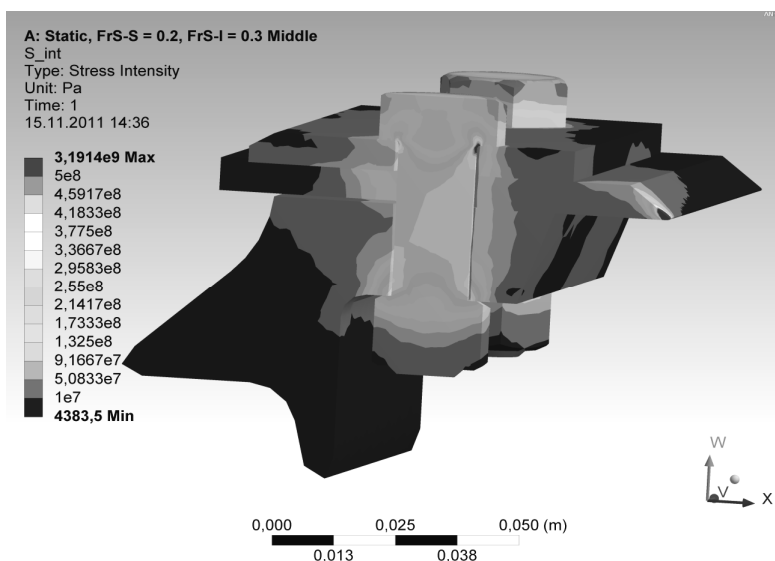


Рис. 2 – Распределение напряжений σ_{int} в системе прижим–нож–опора для чугунного (сверху) и стального (снизу) ножей при нагрузках

Из рис. 2 видно, что наибольшие напряжения концентрируются в области приложения режущей нагрузки и под шляпками болтов. В данных областях нормальные напряжения и интенсивность напряжений примерно на порядок больше, чем в остальных частях системы. В качественном отношении напряженно-деформированное состояние в системе с чугунным и стальным ножом отличаются мало. Значения интенсивности напряжений в области резания примерно на 1% больше в стальном ноже по сравнению с чугунным.

Наибольшие сжимающие напряжения σ_{xx} в области приложения режущей нагрузки примерно на 1–2% больше в чугунном ноже по сравнению со стальным. Наибольшие растягивающие напряжения σ_{yy} в болтах по абсолютному значению меньше сжимающих в области приложения нагрузки примерно на 20% и 10% для чугунного и стального ножей.

Наибольшие значения контактного давления на всех контактных поверхностях системы концентрируются вокруг болтовых соединений. На поверхности контакта прижима и ножа, в соответствии с рис. 3, значение контактного давления в непосредственной близости от приложенной режущей нагрузки достигает примерно 10% от максимума. Такое значительное влияние силы резания на взаимодействие ножа и прижима свидетельствует о проявлении обратного эффекта в трибофатике [1, 2, 4, 5, 7].

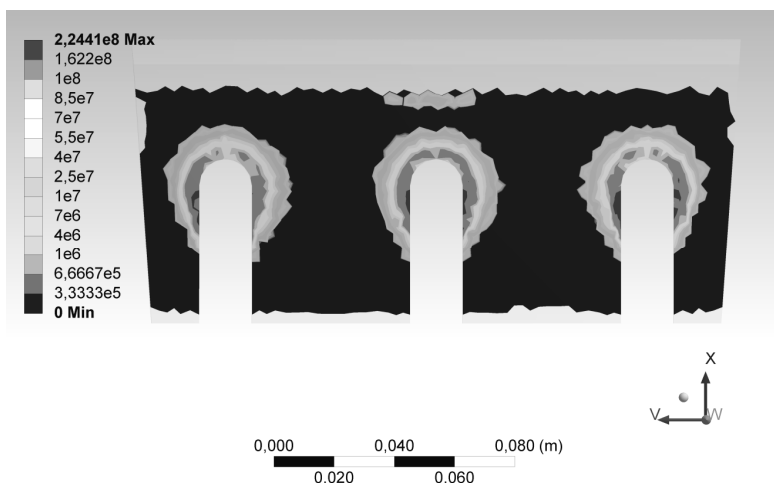


Рис. 3 – Нормальные контактные усилия между прижимом и ножом в системе прижим–нож–опора при нагрузках $F_b = 3295 \text{ Н}$ и $F_c = 56729 \text{ Н}$ для чугунного ножа

В соответствии с рис. 4 при движении режущей нагрузки вдоль кромки ножа от $l/L = 0$ до $l/L = 1$ максимум контактного давления увеличивается примерно на 5% на поверхности контакта прижима и ножа.

Моделирование поврежденности производилось на основе модели деформируемого твердого тела с опасным объемом, состоящего из элементов, в которых значения интенсивности напряжений превышают предельные. Предельные значения для материала исследуемой модели были выбраны равными $\sigma_{\text{int}}^{\text{lim}} = 250, 475, 700 \text{ МПа}$.

Для реализации расчета опасных объемов была создана программа с помощью встроенного в ANSYS языка APDL [3]. Принцип работы программы заключается в следующем. После проведения расчета для i -го конечного

элемента имеются значения средних напряжений и деформаций. Эти значения переносятся в массив, который используется в дальнейших вычислениях значений поврежденности, как отношений действующих и предельных напряжений [3, 6]:

$$\psi_{\text{int}}^i = \sigma_{\text{int}}^i / \sigma_{\text{int}}^{\text{lim}}. \quad (6)$$

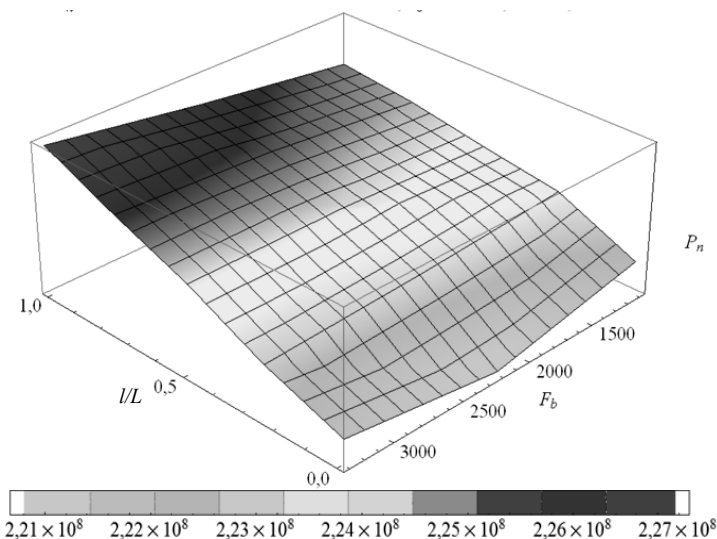


Рис. 4 – Распределение контактного давления на поверхности нож–прижим в зависимости от величины F_b и ее расположения на режущей кромке при $F_c = 56729 \text{ Н}$ для чугунного ножа

Величины объемов элементов, для которых выполняется условие

$$\psi_{\text{int}}^i \geq 1 \quad (7)$$

суммируются для получения значения опасного объема V_{int} для всей расчетной модели. Результатом работы программы является массив конечных элементов, составляющих опасный объем и его значение.

Из рис. 5 видно, что при увеличении предельных напряжений $\sigma_{\text{int}}^{\text{lim}}$ с 250 МПа до 700 МПа величина опасного объема уменьшается примерно в 5,3 раза.

Опасный объем V_{int} для стали примерно на 1% меньше, чем для чугуна. Такое незначительное отличие поврежденности для двух материалов в трехмерной системе при действии сосредоточенной нагрузки свидетельствует о возможности замены стали чугуном при изготовлении ножей.

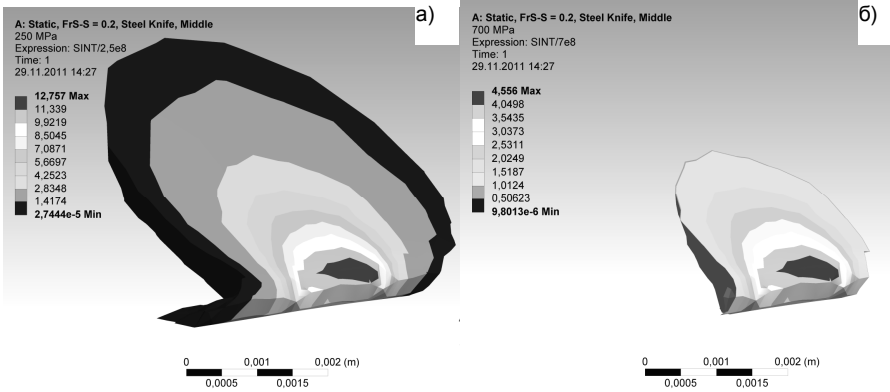


Рис. 5 – Распределение поврежденности ψ_{int} в стальном ноже

для предельных напряжений: а) $\sigma_{int}^{lim} = 250 \text{ МПа}$; б) $\sigma_{int}^{lim} = 700 \text{ МПа}$,

при нагрузках $F_b = 3295 \text{ Н}$, $F_c = 56729 \text{ Н}$, $l = 0,5L$, $\tau = 15^\circ$ и $\beta = 30^\circ$

Из рис. 6 видно, что при увеличении режущей нагрузки с 1098 Н до 3295 Н величины опасных объемов V_{int} увеличиваются примерно в шесть раз. Посередине ножа поврежденность наименьшая. При $l/L = 1$ она увеличивается примерно на 45% и при $l/L = 0$ примерно на 150% по сравнению с серединой ножа.

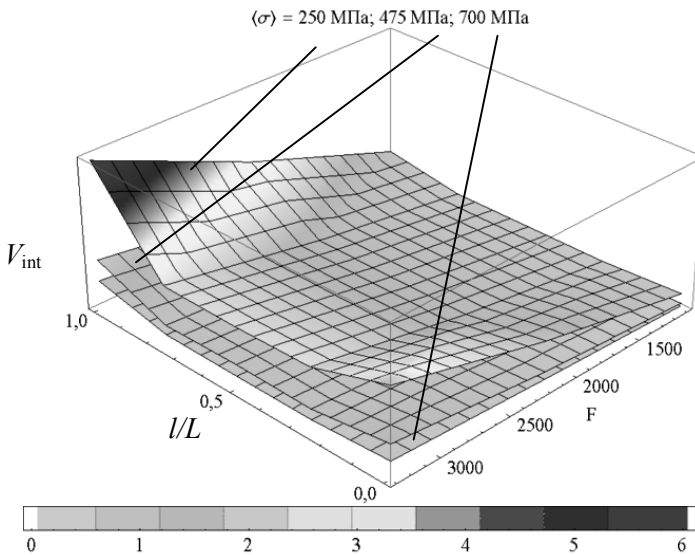


Рис. 6 – Изменение опасного объема V_{int} (10^{-8} м^3) в зависимости от режущей нагрузки и ее положения $0 \leq l/L \leq 1$ для различных значений предельных напряжений для чугунного ножа

Заключение. В результате проведенной работы была сформулирована постановка контактной задачи для многокомпонентной системы нож–прижим–опора с учетом взаимовлияния контактного взаимодействия и объемного деформирования.

Разработаны методики расчета напряженно-деформированного состояния и состояния поврежденности многокомпонентной системы нож–прижим–опора в том числе и в областях контактного взаимодействия с учетом различных материалов ножа, величин сил резания, углов ее приложения, осевых сжимающих усилий в болтах.

Проведено конечноэлементное компьютерное моделирование трехмерного напряженно-деформированного состояния и состояния поврежденности многокомпонентной системы нож–прижим–опора с учетом контактного взаимодействия, влияния величины режущей нагрузки. Исследовано контактное взаимодействие между поверхностями различных компонент системы, в том числе между ножом и прижимом при действии сосредоточенной режущей нагрузки на нож.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЕ ССЫЛКИ

1. **Журавков М. А.** Анализ поврежденности силовой системы с помощью модели деформируемого твердого тела с опасным объемом / М. А. Журавков, С. С. Щербаков // Весці НАНБ. Серыя фіз.-тэхн. навук. – 2010. – № 4. – С 40–43.
2. **Журавков М. А.** Фундаментальные и прикладные задачи трибофатики / М. А. Журавков // Тр. VI Междунар. симпозиума по трибофатике (ISTF 2010), 25 окт.–1 нояб. 2010 г., Минск / редкол. : М. А. Журавков (пред.) [и др.]. – Минск : БГУ, 2010. – Ч. 1. – С. 87–96.
3. **Павловский И. Н.** Компьютерное моделирование поврежденности трибофатической системы с помощью модели деформируемого твердого тела с опасным объемом / И. Н. Павловский, С. С. Щербаков // Тр. VI Междунар. симпозиума по трибофатике (ISTF 2010), 25 окт. – 1 нояб. 2010 г., Минск / редкол. : М. А. Журавков (пред.) [и др.]. – Минск : БГУ, 2010. – Ч. 2. – С. 393–398.
4. **Сосновский Л. А.** Механика износоусталостного повреждения / Л. А. Сосновский. – Гомель: БелГУТ, 2007. – 434 с.
5. **Сосновский Л. А.** Фундаментальные и прикладные задачи трибофатики: курс лекций / Л. А. Сосновский, М. А. Журавков, С. С. Щербаков. – Минск: БГУ, 2011. – 488 с.
6. **Щербаков С. С.** Контактная задача. Анализ опасных объемов / С. С. Щербаков // Проблеми обчислювальної механіки і міцності конструкцій: зб. наук. праць / Дніпропетр. нац. ун-т; редкол. : А. П. Дзюба [и др.]. – Дніпропетровськ : ІМА-прес, 2009. – Вип. 13. – С. 279–285.
7. **Щербаков С. С.** Механика трибофатических систем / С. С. Щербаков, Л. А. Сосновский. – Минск: БГУ, 2011. – 407 с.

*Белорусский государственный университет,
Минск, Беларусь,
РУП «Гомсельмаш»,
Гомель, Беларусь*

Поступила в редколлегию 09.03.2012

С. С. Щербаков, канд. фіз.-мат. наук, М. В. Псирков, О. О. Насань

КОМП'ЮТЕРНЕ МОДЕЛЮВАННЯ ПОШКОДЖУВАНOSTI СИСТЕМИ ПРИЖИМ–НІЖ–ОПОРА У ТРИВИМІРНІЙ ПОСТАНОВЦІ

Для багатокомпонентної системи прижим–ніж–опора ріжучого барабана комбайна сформульована постановка контактної задачі з врахуванням взаємовпливу контактної взаємодії та об'ємного деформування. Розраховано напружено-деформований стан системи з врахуванням властивостей матеріалу ножа та різної величини сили різання. Проведена оцінка стану просторової пошкодженості ножа із високоміцного чавуну в області різання на основі моделі деформівного твердого тіла з небезпечним об'ємом.

Ключові слова: трибофатична система, пошкодженість, контактна взаємодія, ріжучий інструмент, скінченно-елементне моделювання.

S. S. Scherbakov, Associate Professor, N. V. Psyrkov, O. A. Nasan'

COMPUTER SIMULATION OF DAMAGE OF CLAMP-KNIFE-SUPPORT SYSTEM IN THREE-DIMENSIONAL STATEMENT

Statement of the contact problem is formulated for multicomponent clamp-knife-support system taking into account mutual influence between the contact and the volume deformation. System stress-strain state is calculated with the account of material properties of knife and cutting force of various magnitudes. Assessment of the state of spatial damage of high strength iron blade in the cutting region basing on the model of a solid with dangerous volume is made.

Keywords: tribo-fatigue system, damage, contact interaction, cutting instrument, finite element simulation.