

УДК 517.958: 539.3; 541.43/49; 539.62; 532.516; 539.375.6

С. С. ЩЕРБАКОВ, доктор физико-математических наук, О. А. НАСАНЬ, магистр физико-математических наук, Белорусский государственный университет, Минск

## ОБЪЕМНАЯ ПОВРЕЖДАЕМОСТЬ И ИЗНОС НОЖА В ТРИБОФАТИЧЕСКОЙ СИСТЕМЕ РЕЖУЩЕГО ИНСТРУМЕНТА КОРМОУБОРОЧНОГО КОМБАЙНА

Проведено конечно-элементное моделирование динамического напряженно-деформированного состояния многоэлементной системы режущего инструмента сельскохозяйственного комбайна с учетом многочисленных контактных взаимодействий с трением между ножом и основанием, прижимом, зеленой массой; болтов с прижимом, ножом, основанием; противорежущим брусом и зеленой массой. Для режущих областей ножа и противорежущего бруса получены распределения интенсивности напряжений, проведена оценка объемной повреждаемости, разработана методика расчета и накопления износа в режущей области на основе теории опасных объемов по двум критериям износа. Проведен сравнительный анализ влияния комбинаций материалов (стали и материала Моника) ножа и противорежущего бруса на величины опасных объемов, интегральной повреждаемости и накопленного износа данных элементов системы. Результаты расчетов показали, что наименьший износ наблюдается в системе для ножа из Моника и стального противорежущего бруса.

**Введение.** Контактное взаимодействие ножа и противорежущего бруса, опосредованное резанием зеленой массы, является важнейшим процессом в работе режущего инструмента кормоуборочного комбайна. Оно в значительной степени определяет экономическую эффективность данного инструмента. Параметры контактного взаимодействия обуславливают прочность, ресурс не только самой системы нож/противорежущий брус, но и других элементов режущего инструмента и комбайна в целом.

К настоящему моменту основным подходом к анализу подобных систем, работающих в условиях резания, является использование методологии механики контактного взаимодействия и трибологии [1, 2].

Развитие нового направления в современной механике – трибофатики заложило основы для создания более полного подхода к анализу рассматриваемой системы [3, 4]. Ее трибофатическая модель учитывает как контактное взаимодействие с трением между элементами системы (между прижимом и ножом, ножом и основанием), так и объемное деформирование ножа при изгибе.

Усовершенствование режущего инструмента комбайна проводится на ОАО «Гомсельмаш» посредством замещения стальных ножей и противорежущих брусьев на изготовленные из чугуна марки ВЧТГ (нового конструкционного материала Моника) [5–7]. Данный высокопрочный материал отечественной разработки имеет высокие прочностные (до 1500 МПа), и пластические (относительное удлинение до 4 %) характеристики.

Таким образом, применение нового материала для изготовления ножей и противорежущих брусьев потребовало решения задачи оценки динамического напряженно-деформированного состояния системы болты/прижим/нож/основание/противорежущий брус с учетом как контактного, так и неконтактного взаимодействия между ее элементами в наиболее общей постановке.

В соответствии с большинством таких хорошо известных моделей износа, как Арчарда, Шпехта, ВНИИЖТ [8, 9] объем

износа рассчитывается исходя из длины пути скольжения, контактной нагрузки, эмпирического коэффициента износа, твердости поверхности, и других параметров поверхности контакта. Однако последние экспериментальные исследования показывают, что процессы трения и износа во многом зависят от напряженно-деформированного состояния объемной области под контактной поверхностью [3, 4]. Данное напряженно-деформированное состояние может быть существенно (на 20–40 %) изменено под действием неконтактных нагрузок. В моделях, использующих только параметры контактной поверхности подобным влиянием обычно пренебрегают.

Таким образом, существует необходимость в разработке модели износа, основанной не только на контактных граничных условиях (максимальное давление, коэффициент трения, скорость и т.д.), но и на напряженно-деформированном состоянии и состоянии повреждаемости в объемной окрестности зоны контакта. Данные состояния должны учитывать как контактные граничные условия, так и неконтактное (объемное) деформирование при растяжении-сжатии или изгибе.

**Постановка задачи.** Для учета наибольшего числа факторов, влияющих на напряженно-деформированное состояние ножа и противорежущего бруса, рассматривалась система зеленая масса/болты/прижим/нож/основание/противорежущий брус (рисунок 1).

Наиболее полная трибофатическая постановка задачи для многоэлементной системы учитывает как многочисленные локальные контактные взаимодействия между элементами системы (ножа и основания, ножа и прижима, ножа и зеленой массы, болтов с прижимом, ножом и основанием, противорежущего бруса и зеленой массы), так и изгиб ножа при резании зеленой массы [8, 11]. Для моделирования зеленой массы, которая обычно состоит из слабовзаимодействующих стеблей, целесообразно рассматривать ее в качестве многоэлементной («многостеблевой») системы в виде ряда одинаковых по ширине пластин (см. рисунок 1, а).

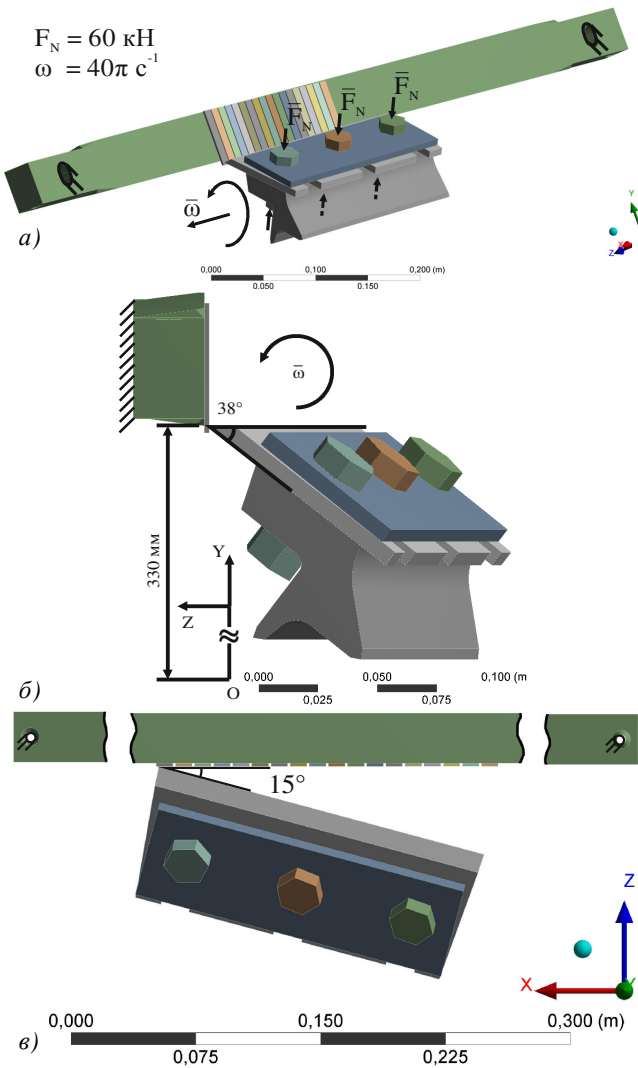


Рисунок 1 – Схема нагружения:

*a* – геометрическая модель системы с многоэлементной зеленой массой; *б* – указание расположения осей и центра вращения; *в* – угол резания зеленой массы  $\tau$ ;  $z$  – угол резания зеленой массы  $\beta$

Расположение координатных осей и центра вращения, углы установки ножа  $\tau = 15^\circ$ ,  $\beta = 38^\circ$  показаны на рисунках 1, *a–в*.

Для конкретной конфигурации  $k$ -го тела системы, заданной его положением в пространстве  $\mathbf{r}^k$  в некоторый момент времени  $t$ , выполняются соотношения, определяющие механическое состояние частицы (элементарного объема) тела: уравнение неразрывности, уравнения движения частиц тела, зависимость между перемещениями и деформациями и закон Гука [4].

К данным уравнениям добавляются граничные условия первого типа для противорежущего бруса (см. рисунок 1, *б*), на поверхности  $S_u$  которого заданы перемещения  $\bar{u}_i^{k*}(\mathbf{r}^k)$ :

$$u_i^k = \bar{u}_i^{k*}(\mathbf{r}^k, t), \quad i = x, y, z \quad (1)$$

и второго типа для болтов, на поверхности  $S_\sigma$  которых задано распределение усилий  $\bar{p}_i$  (см. рисунок 1, *б*):

$$\sigma_{ij}^k \alpha_j^k = \bar{p}_i(\bar{\mathbf{F}}_N, \mathbf{r}^k, t), \quad (2)$$

где  $\alpha_j^k$  – направляющие косинусы.

Начальные условия определены следующим образом (см. рисунок 1, *б*):

$$u_i^k \Big|_{t=0} = u_i^{k0}, \quad \dot{u}_i^k \Big|_{t=0} = \dot{u}_i^{k0}(\bar{\omega}). \quad (3)$$

Взаимодействие  $n$  деформируемых тел системы можно описать с помощью контактных граничных условий, определяемых следующими соотношениями:

$$\bar{\mathbf{u}}_l \Big|_{S_u^{(lm)}} - \bar{\mathbf{u}}_m \Big|_{S_u^{(lm)}} = \delta_{lm}^{(u)}(f_{lm}, \mathbf{r}^l, \mathbf{r}^m, t) \Big|_{S_u^{(lm)}}, \quad (4)$$

$$\bar{\mathbf{p}}_l \Big|_{S_\sigma^{(lm)}} - \bar{\mathbf{p}}_m \Big|_{S_\sigma^{(lm)}} = \delta_{lm}^{(\sigma)}(f_{lm}, \mathbf{r}^l, \mathbf{r}^m, t) \Big|_{S_\sigma^{(lm)}}, \quad (5)$$

где  $S^{(lm)}$  – поверхность контакта тел  $l$  и  $m$ ,  $S_\sigma^{(lm)} \subset S^{(lm)}$ ,  $S_u^{(lm)} \subset S^{(lm)}$ ;  $\bar{\mathbf{p}}_k = \{\bar{p}_1^k, \bar{p}_2^k, \bar{p}_3^k\} = \{p_n^k, p_{\tau 1}^k, p_{\tau 2}^k\}$  и  $\bar{\mathbf{u}}_k = \{\bar{u}_1^k, \bar{u}_2^k, \bar{u}_3^k\}$  – векторы усилий и перемещений на поверхности  $k$ -го тела;  $p_n^k, p_{\tau 1}^k, p_{\tau 2}^k$  – нормальная и касательные компоненты вектора усилий;  $\delta_{lm}^{(u)} = \{\delta_{lm}^{(n,u)}, \delta_{lm}^{(\tau 1,u)}, \delta_{lm}^{(\tau 2,u)}\}$ ,  $\delta_{lm}^{(\sigma)} = \{\delta_{lm}^{(n,\sigma)}, \delta_{lm}^{(\tau 1,\sigma)}, \delta_{lm}^{(\tau 2,\sigma)}\}$  – векторы перемещений и усилий на поверхности контакта;  $f_{lm}$  – коэффициенты трения для соответствующих пар тел.

Основание, нож, прижим и болты движутся со скоростью  $\omega = 125,664$  рад/с, вращаясь вокруг центра режущего барабана в соответствии с рисунками 2, *a* и 2, *б*. Зеленая масса и противорежущий брус находятся в условиях жесткой сцепки. Усилие затяжки болтовых соединений равно  $F_N = 60$  кН для каждого болта.

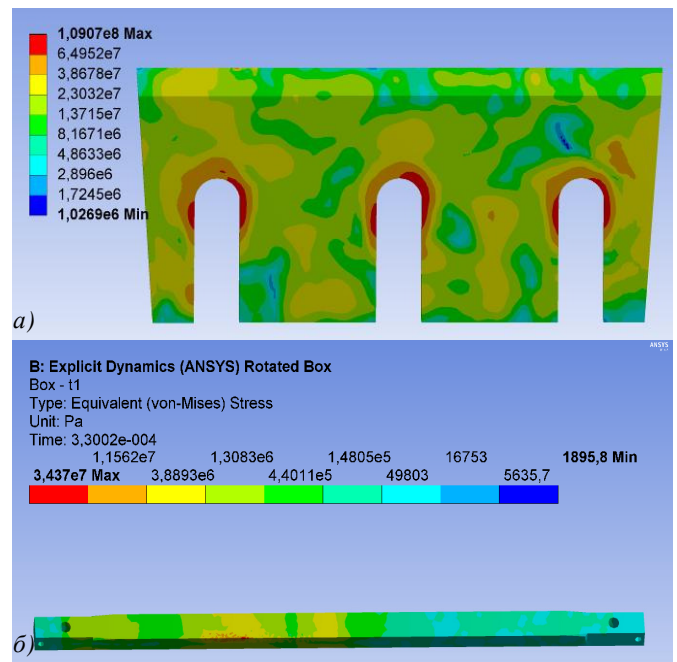


Рисунок 2 – Контурные логарифмические распределения третьего главного напряжения во все моменты времени в системе IS4 на режущих кромках:

*a* – ножа; *б* – противорежущего бруса

Граничные задачи (1)–(5) решались для трех зазоров между режущими кромками ножа и противорежущего бруса, характерных для различной степени износа ножа: 0,4; 0,8 и 1,2 мм.

Таблица 1 расчетов включает в себя все комбинации пар материалов сталь и Моника.

Таблица 1 – Обозначения расчетов

Зазор между брусом и ножом, мм	Комбинации материалов			
	брус и нож из Моника	брус из Моника, стальной нож	стальной брус, нож из Моника	стальные нож и брус
0,4	4II	4IS	4SI	4SS
0,8	8II	8IS	8SI	8SS
1,2	12II	12IS	12SI	12SS

Механические свойства элементов системы, принятые в расчетах, приведены в таблицах 2–3.

Таблица 2 – Свойства материалов системы

Свойства	Материалы		
	зеленая масса	чугун	сталь
$E$ , Па	$2,7451 \cdot 10^8$	$1,65 \cdot 10^{11}$	$2 \cdot 10^{11}$
$\nu$	0,12	0,28	0,3
$\rho$ , кг/м <sup>3</sup>	800	7200	7850

Таблица 3 – Коэффициенты трения (динамика/статика) между различными материалами

Наименование	Зеленая масса	Моника	Сталь
Зеленая масса	0,39/0,58	0,39/0,58	0,39/0,58
Моника	0,39/0,58	–	0,3/0,3
Сталь	0,39/0,58	0,3/0,3	0,2/0,2

Каждый расчет состоял из двух этапов: моделирования статического преднапряженного состояния для учета влияния затяжки болтовых соединений на напряженно-деформированное состояние системы и динамического резания зеленой массы [5]. Ускорение при расчете преднапряженного состояния не задавалось, поскольку в динамической постановке задачи оно учитывается естественным образом. Нижняя поверхность основания была жестко закреплена (моделировалась жесткая сцепка с внешней поверхностью барабана). Задняя стенка противорезающего бруса также была жестко закреплена.

Анализ напряженно-деформированного состояния проводился для шести моментов времени:  $t_0 = 0,00003$  с,  $t_1 = 0,00033$  с,  $t_2 = 0,00063$  с,  $t_3 = 0,00093$  с,  $t_4 = 0,00123$  с,  $t_5 = 0,00153$  с, где  $t_0$  и  $t_5$  являются начальным и конечным временем процесса резания соответственно.

В начальный момент времени динамического расчета в модели учтено лишь преднапряженное статическое состояние от затяжки болтов.

Оптимизация сетки всей системы привела к изменению максимальных по интенсивности напряжений на 10 %. При этом изменение сетки произошло лишь в области болтовых соединений, а число конечных элементов существенно возросло, что значительно увеличило время расчетов. Поскольку изменение сетки не затронуло главную исследуемую область – контактные поверхности ножа и бруса, расчеты проводились для модели с первоначальным конечно-элементным разбиением.

**Напряженное состояние.** Распределения интенсивности напряжений на режущей кромке ножа определяются как максимумами (примерно 10–800 МПа) в окрестности резания в некоторый момент времени, так и интерференцией волн напряжений, обуславливающей

неравномерный характер распределений вне зоны резания (см. рисунок 2, а).

Наибольшие напряжения в ноже появляются на кромке лезвия и в окрестности болтовых соединений.

Наибольшие эквивалентные напряжения на кромке лезвия ножа увеличиваются в 1,5–8 раз при ударном резании по сравнению со статическим преднапряженным состоянием.

Максимальные напряжения в ноже при различных комбинациях материалов ножа и бруса отличаются незначительно: примерно на 10–20 %, что в первую очередь обуславливается интерференцией волн напряжений. В большинстве рассматриваемых моментов времени наименьшие  $\sigma_{\text{int}}^{\text{max}}$  наблюдаются в расчетах IS и SI.

Распределение интенсивности напряжений в бруске в меньшей степени искажается интерференцией волн напряжений из-за менее сложной формы поверхности бруса. На рисунке 2, б видно, что наибольшие напряжения появляются на кромке бруса в окрестности резания зеленой массы. В бруске в отличие от ножа в момент начального удара нет значимого всплеска интенсивности напряжений, что может объясняться демпфирующим эффектом зеленой массы.

В целом, анализ результатов расчетов показывает, что Моника демонстрирует схожую со сталью нагруженность. Учитывая большую вязкость Моника, обуславливающую лучшее рассеяние волн напряжений, ее применение представляется предпочтительным.

**Состояние объемной повреждаемости.** Как следует из предыдущего пункта, традиционный анализ максимальных напряжений в системе осложнен ее многоэлементной структурой и нестационарностью напряженного состояния, обусловленного динамической интерференцией волн напряжений. Таким образом, для интегральной оценки состояния системы целесообразно обратиться к характеристикам объемной повреждаемости.

Оценка повреждаемости элементов конструкций при циклическом нагружении в общем случае основывается на статистической модели деформируемого твердого тела с опасным объемом [3]. В рамках данной модели опасные объемы представляют собой трехмерные области, где напряжения превышают критический уровень – нижнюю границу рассеяния пределов усталости.

Применительно к трибофатическим системам [4] процедура расчета опасных объемов предполагает, во-первых, знание трехмерного напряженного состояния элементов, вызванного как контактным нагружением, так и объемным деформированием, и, во-вторых, определения критических (предельных) напряжений, которые служат критерием для ограничения соответствующих опасных областей.

В связи с тем, что в области резания зеленой массы напряженно-деформируемые состояния ножа и противорезающего бруса являются существенно трехмерными и формируются в основном за счет контактного взаимодействия, будем их оценивать с помощью четвертой, энергетической, теории прочности для следующих эквивалентных напряжений:

$$\sigma_{IV} = \sigma_{int} = \frac{1}{\sqrt{2}} \sqrt{\sigma_1^2 + \sigma_2^2 + \sigma_3^2 - \sigma_1\sigma_2 - \sigma_2\sigma_3 - \sigma_3\sigma_1}. \quad (6)$$

В этом случае функция локальной повреждаемости единицы объема примет вид

$$\psi_{IV} = \sigma_{IV} / \sigma_{IV}^{(lim)}, \quad (7)$$

где  $\sigma_{IV}^{(lim)}$  – нижняя граница рассеяния пределов выносливости материала.

Тогда формулы для расчета опасных объемов и интегральной повреждаемости будут следующими [4]:

$$V_{IV} = \int_{\psi_{IV}(V) \geq 1} dV, \quad \Psi_{IV} = \int_{\psi_{IV}(V) \geq 1} \psi_{IV}(V) dV. \quad (8)$$

Поскольку в настоящее время нет точных данных о предельных состояниях (напряжениях) при фрикционной усталости элементов системы в процессе резания зеленой массы, то в расчетах рассматривался широкий диапазон предельных напряжений от 8,5 МПа, соответствующих пределу фрикционной усталости в системе сталь/полимер [3], до 125 МПа, примерно соответствующих нижней границе рассеяния предела механической усталости стали [3], с интервалом 5,825 МПа.

Временной интервал резания  $[3 \cdot 10^{-5}; 1,53 \cdot 10^{-3}]$  с, для получения гладких зависимостей, разбивался на 20 равных частей, и результаты, соответственно, рассматривались в 21-й равноотстоящей с шагом  $7,5 \cdot 10^{-5}$  с точке. Общий вид опасных объемов представлен на рисунках 3, а, б.

Из-за интерференции волновых пакетов величины опасных объемов  $V_{IV}$  и интегральной повреждаемости  $\Psi_{IV}$  в ноже и бруске испытывают колебания в меньшей степени, чем показатели напряженно-деформированного состояния системы, что позволяет более точно определять зависимости повреждаемости режущих элементов от изменения основных параметров модели.

В ноже  $V_{IV}$  и  $\Psi_{IV}$  принимают наибольшие значения в начале и в конце процесса резания. Это может объясняться тем, что в данные моменты времени напряжения в ноже распределяются в меньшем объеме материала (в углах ножа) по сравнению с основным процессом резания, когда работает средняя часть ножа.

Например, при предельном напряжении  $\sigma_{lim} = 25,975$  МПа и зазоре 0,4 мм  $V_{IV}$  и  $\Psi_{IV}$  в ноже принимают следующие примерные значения: а) в начале резания –  $10^4$  мм<sup>3</sup>, б) в середине –  $1-10^2$  мм<sup>3</sup>, в) в конце –  $10^3-1,5 \cdot 10^3$  мм<sup>3</sup> (см. рисунки 3, в, г).

Для дальнейшего анализа динамического нагружения ножа будем пользоваться показателем накопления во времени опасного объема

$$V_{IV}^{\Sigma t} = \int_t \int_{\psi_{IV}(V) \geq 1} dV dt \quad (9)$$

и накопленной интегральной повреждаемости

$$\Psi_{IV}^{\Sigma t} = \int_t \int_{\psi_{IV}(V) \geq 1} \psi_{IV}(V, t) dV dt. \quad (10)$$

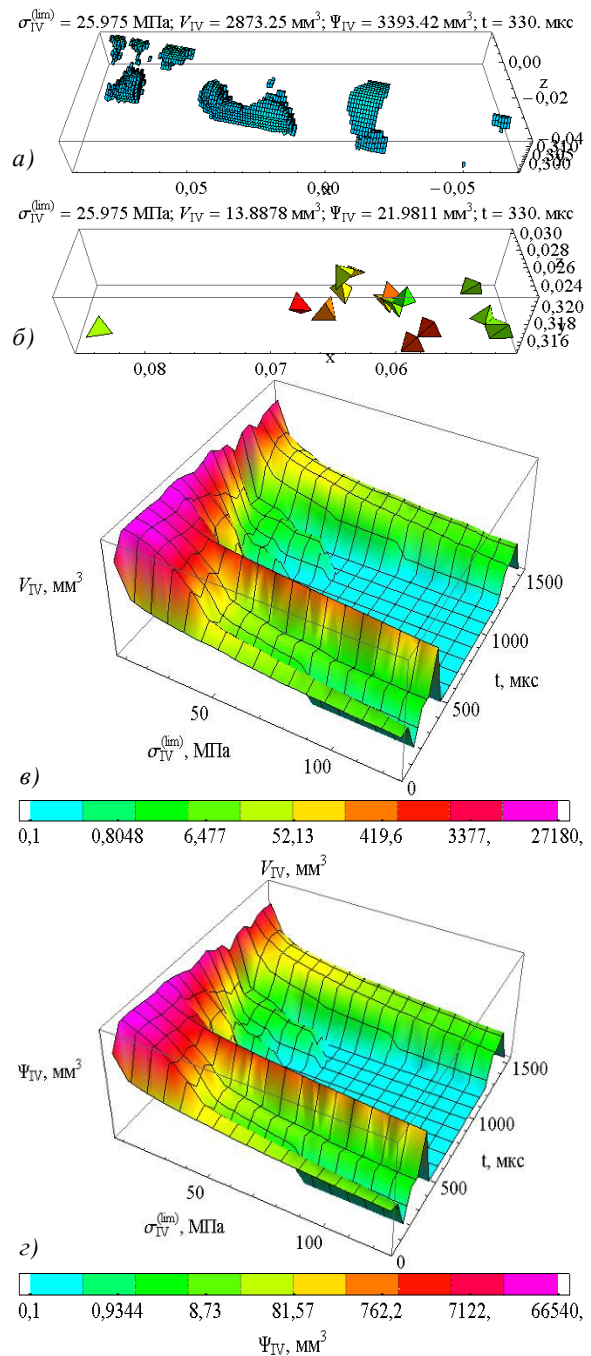


Рисунок 3 – Изменения: а – опасных объемов в ноже в момент времени  $t = 330$  мкс при  $\sigma_{lim} = 25,975$  МПа; б – опасных объемов в противорежущем бруске в момент времени  $t = 330$  мкс при  $\sigma_{lim} = 25,975$  МПа; в – опасного объема; г – объемной повреждаемости для эквивалентных напряжений рассчитанных по четвертой теории прочности в системе 4II

Анализ графиков на рисунке 4 показывает, что для комбинаций материалов стальной брус / чугунный нож (расчеты  $S_I$ ) либо чугунный брус / стальной нож (расчеты  $I_S$ ) накопленные во времени опасный объем и объемная повреждаемость принимают минимальные значения. Например, при  $\sigma_{lim} = 25,975$  МПа, зазоре 0,4 мм и комбинации материалов стальной брус/чугунный (расчет  $S_I$ ) нож  $V_{IV}^{\Sigma t}$ ,  $\Psi_{IV}^{\Sigma t}$  составляют  $3,261 \cdot 10^6$  мм<sup>3</sup> · мкс и  $4,106 \cdot 10^6$  мм<sup>3</sup> · мкс соответственно (см. рисунки 4, а, б).



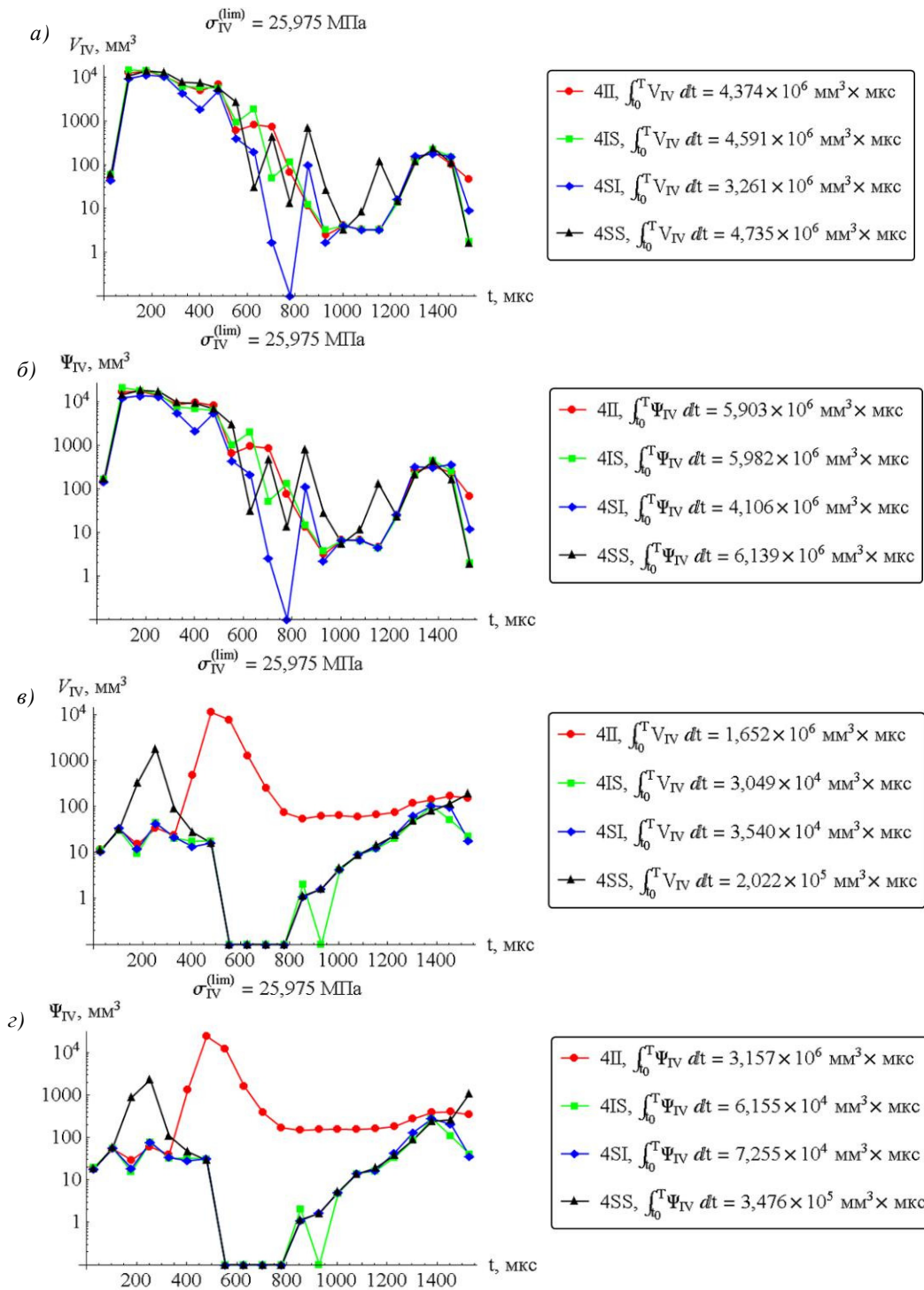


Рисунок 4 – Распределения: а – опасных объемов в ноже; б – интегральной повреждаемости в ноже; в – опасных объемов в противорежущем брус; г – интегральной повреждаемости в противорежущем брус для различных свойств материалов при  $\sigma_{lim} = 25,975$  МПа и зазоре 0,4 мм

Для комбинации материалов чугунный брус / чугунный нож (расчеты II)  $V_{IV}^{\Sigma t}$  и  $\Psi_{IV}^{\Sigma t}$  больше примерно на 34 и 44 %, чугунный брус / стальной нож (расчет IS)  $V_{IV}^{\Sigma t}$  и  $\Psi_{IV}^{\Sigma t}$  больше примерно на 41 и 46 %, стальной брус/стальной нож (расчеты SS)  $V_{IV}^{\Sigma t}$  и  $\Psi_{IV}^{\Sigma t}$  больше примерно на 45 и 50 % соответственно, чем в расчетах SI.

При увеличении предельных напряжений  $\sigma_{lim}$  с 25,975 до 119,175 МПа накопленные опасный объем  $V_{IV}^{\Sigma t}$  и по-

вреждаемость  $\Psi_{IV}^{\Sigma t}$  для различных комбинаций материалов уменьшаются примерно на четвертого порядка.

При увеличении зазора между ножом и брусом  $\sigma_{lim}$  с 0,4 до 0,8 и 1,2 мм  $V_{IV}^{\Sigma t}$ ,  $\Psi_{IV}^{\Sigma t}$  увеличиваются примерно на 32, 34 и 17, 19 % соответственно.

Рассмотрим теперь повреждаемость противорежущего бруса.

Из анализа результатов расчетов следует, что в противорежущем брус и ноже  $V_{IV}^{\Sigma t}$  и  $\Psi_{IV}^{\Sigma t}$  принимают

наибольшие значения в начале и в конце процесса резания (см. рисунки 4, в, з). Это может объясняться ударным характером (резким изменением) взаимодействия ножа и бруса в данные моменты времени.

Например, при предельном напряжении  $\sigma_{lim} = 25,975$  МПа и зазоре 0,4 мм  $V_{IV}$  и  $\Psi_{IV}$  в брус принимают следующие примерные значения: а) в начале резания –  $10-10^4$  мм<sup>3</sup>, б) в середине –  $0-80$  мм<sup>3</sup>, в) в конце –  $10-10^2$  мм<sup>3</sup>.

Для комбинаций материалов стальной брус / чугунный нож либо чугунный брус / стальной нож (расчеты  $SI$  либо  $IS$ )  $V_{IV}^{\Sigma t}$ ,  $\Psi_{IV}^{\Sigma t}$  принимают минимальные значения. При  $\sigma_{lim} = 25,975$  МПа, зазоре 4 мм и комбинации материалов чугунный брус / стальной нож (расчет  $IS$ )  $V_{IV}^{\Sigma t}$ ,  $\Psi_{IV}^{\Sigma t}$  в брус составляют  $3,049 \cdot 10^4$  мм<sup>3</sup> · мкс и  $6,155 \cdot 10^4$  мм<sup>3</sup> · мкс соответственно. Показатели  $V_{IV}^{\Sigma t}$  и  $\Psi_{IV}^{\Sigma t}$  в брус больше для комбинации материалов чугунный брус / чугунный (расчеты  $II$ ) нож примерно в 54 и 51 раз, стальной брус / чугунный нож – примерно на 16 и 18 % (расчеты  $SI$ ), стальной брус / стальной нож (расчеты  $SS$ ) – примерно в 6,6 и 5,7 раза соответственно в сравнении с расчетом  $IS$ .

При увеличении предельных напряжений  $\sigma_{lim}$  с 25,975 до 119,175 МПа  $V_{IV}^{\Sigma t}$  и  $\Psi_{IV}^{\Sigma t}$  для различных комбинаций материалов уменьшаются примерно в 20–100 раз.

При увеличении зазора между ножом и брусом  $\sigma_{lim}$  с 0,4 до 0,8 и 1,2 мм значения  $V_{IV}^{\Sigma t}$ ,  $\Psi_{IV}^{\Sigma t}$  в брус увеличиваются примерно на 46, 62 и 87, 86 % соответственно.

**Износ.** Рассмотрим трибофатическую методику расчета износа на примере режущей кромки ножа.

Срок службы ножа рассчитывался, исходя из предположения о непрерывной работе в течение двух месяцев по 20 часов в сутки. Учитывая, что нож вращается на барабане с частотой 20 Гц, за весь период работы он совершает 86 400 000 циклов резания, укорачиваясь при этом на 2 см, что с учетом геометрических характеристик ножа (рисунок 5) соответствует 28 280 мм<sup>3</sup>. Поскольку режущая кромка время от времени затачивается, целесообразно рассматривать форму режущей области как практически неизменную.

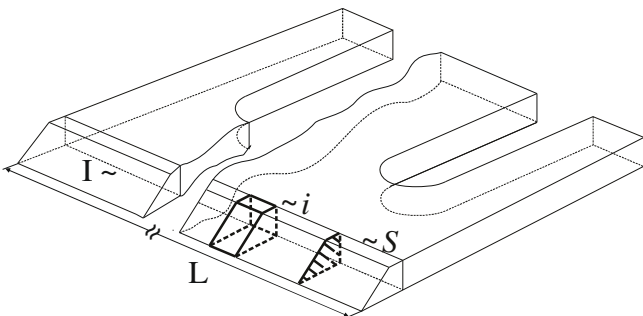


Рисунок 5 – К описанию износа

Определим износ полосы материала вдоль элементарного отрезка режущей кромки ножа  $i$  согласно рисунку 5:

$$i = \Delta S = I / n_L, \quad (11)$$

где  $\Delta$  – ширина расчетной ячейки вдоль режущей кромки ножа;  $S$  – сечение изнашиваемой полосы материала шириной в одну ячейку перпендикулярно режущей кромке ножа;  $I$  – полный износ ножа;  $n_L$  – количество ячеек вдоль режущей кромки ножа.

Согласно этим обозначениям, полный износ ножа будет соответствовать:

$$I_{lim} = \int_0^L S_{lim} dl = \sum_{j=1}^N i_{lim}^j, \quad (12)$$

где  $I_{lim}$  – предельный износ ножа, составляющий 2 см от его ширины.

Предельный износ оценивался по двум критериям:

1) как суммарный объем изношенного материала, равный объему режущей области ножа шириной в 2 см (*средний износ*):

$$i = I / n_L = i_{lim}; \quad (13)$$

2) как максимальный локальный объем изношенного материала ячейки шириной  $\Delta$ , соответствующий линейному износу в 2 см (*максимальный локальный износ*):

$$i^{max} = \Delta S = i_{lim}. \quad (14)$$

Для оценки по этим критериям введем показатель удельного опасного объема к единице времени:

$$V^{(t)} = \frac{\partial V}{\partial t} = \left[ \frac{M^3}{c} \right] \quad (15)$$

и удельного опасного объема к единице длины (опасная площадь):

$$V^{(l)} = \frac{\partial V}{\partial l} = S = \left[ M^2 \right]. \quad (16)$$

Соответственно, формирование удельного к единице времени и длины опасного объема определяется следующим соотношением:

$$V_{IV}^{(t,l)} \leftrightarrow \left\{ dV^{(t,l)} \subset V / \sigma_{IV} \geq \sigma_{IV}^{lim} \right\} = \left[ \frac{M^2}{c} \right], \quad (17)$$

или в дискретном виде:

$$V_{IV}^{(t_j,l)} = \sum_{\kappa=1}^{n_V} dV_{\kappa}^{(t_j,l)}. \quad (18)$$

Интегрируя (17) по времени нагружения  $t^*$ , получаем накопление удельного к единице длины опасного объема, что является удельным износом материала для элементарного отрезка режущей кромки ножа:

$$i_{IV}^{(l)} = kV_{IV}^{(l)} = k \int_0^{t^*} V_{IV}^{(t,l)} dt = k \int_0^{t^*} S_{IV}^{(t)} dt = kS_{IV}, \quad (19)$$

или в дискретном виде:

$$i_{IV}^{(l)} = kV_{IV}^{(l)} \approx kV_{IV}^{(\Sigma T,l)} = k \sum_{j=1}^{n_T} V_{IV}^{(t_j,l)} \Delta t, \quad (20)$$

где  $\Delta_q$  – длина  $q$ -й ячейки;  $\Delta t$  – шаг по времени,  $k$  – поправочный коэффициент, определяющий характер накопления износа.

Таким образом, на основе (19), (20) может быть записана связь между локальным износом и опасным объемом в дифференциальной форме:

$$\frac{\partial i_{IV}^{(l)}}{\partial t} = i_{IV}^{(t,l)} = kV_{IV}^{(t,l)}. \quad (21)$$

Анализируя распределения опасных объемов в рабочей области ножа в каждый момент времени для каждой ячейки  $\Delta$  (приращения удельного износа, см. рисунок 6, а), видно, что наибольшая объемная повреждаемость приходится на первую треть цикла резания. Подставляя величины из рисунка 6, а в (20), получим удельный износ режущей кромки ножа (см. рисунок 6, б).

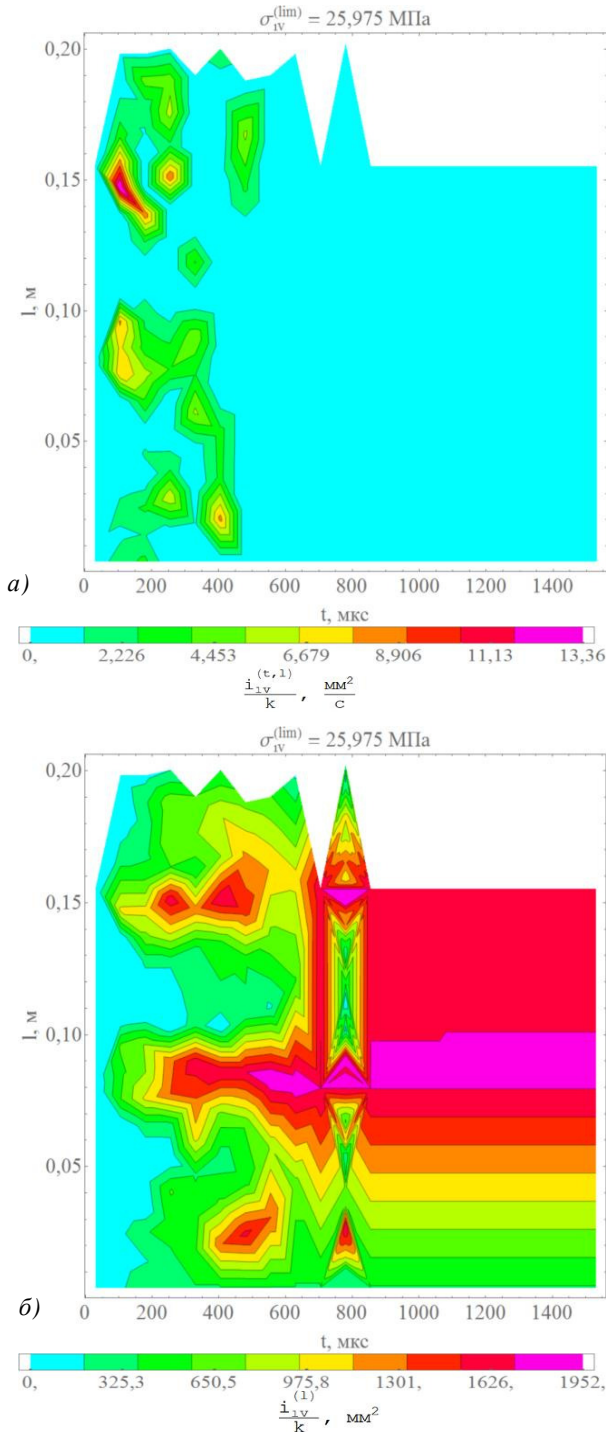


Рисунок 6 – Профили: а – приращений удельного износа; б – удельного износа режущей кромки ножа за цикл резания для расчета  $4I$

При фиксированном времени  $t^*$  для большей наглядности представим распределения из рисунка 6 на двумерном графике (рисунок 7), из которых видно, что уже в момент цикла резания  $t = 1 \text{ мс}$  формирование износа практически заканчивается.

На основе (19) полный износ ножа за время нагружения  $t^*$  будет иметь следующий вид:

$$I_{IV} = \int_0^L i_{IV}^{(l)} dl = k \int_0^L V^{(l)} dl = k \int_0^L \int_0^{t^*} V_{IV}^{(t,l)} dt dl = k \int_0^L S_{IV} dl = kNV_{IV}, \quad (22)$$

или, предполагая возможность изменения порядка интегрирования, в дифференциальной форме:

$$\frac{\partial I_{IV}}{\partial t} = kV_{IV}^{(t)}. \quad (23)$$

Для случая нагружения системы в течение  $N$  циклов, полагая износ за цикл аддитивным, получим удельный к единице длины ( $\text{м}^2$ ) износ материала ножа с учетом (19):

$$i_{IV}^{(l)} = kNV_{IV}^{(l)} = kN \int_0^{t^*} V_{IV}^{(t,l)} dt = kN \int_0^{t^*} S_{IV}^{(t)} dt = kNS_{IV}. \quad (24)$$

Тогда износ материала вдоль элементарного отрезка режущей кромки ножа к единице длины ( $\text{м}^3$ ) определится следующим образом:

$$i_{IV} = N \int_{\Delta_q}^{\Delta_{q+1}} i_{IV}^{(l)} dl = kN \int_{\Delta_q}^{\Delta_{q+1}} V_{IV}^{(l)} dl = kN \int_{\Delta_q}^{\Delta_{q+1}} S_{IV} dl = kNV_{IV}^q. \quad (25)$$

Представим формулу (25) в дискретной форме:

$$i_{IV}^q \approx kNV_{IV}^{(\Sigma T, l)} \Delta_q = kN \sum_{j=1}^{nT} V_{IV}^{(t_j, l)} \Delta t_j \Delta l_q. \quad (26)$$

Наконец, с учетом предположения об аддитивности износа и выражения (22), полный износ ножа в течение  $N$  циклов примет вид

$$I_{IV} = \int_0^L i_{IV}^{(l)} dl = kN \int_0^L V^{(l)} dl = kN \int_0^L \int_0^{t^*} V_{IV}^{(t,l)} dt dl = k \cdot N \int_0^L S_{IV} dl = kNV_{IV} \quad (27)$$

или в дискретной форме:

$$I_{IV} \approx \sum_{q=1}^{nL} i_{IV}^q \approx kN \sum_{q=1}^{nL} V_{IV}^{(\Sigma T, l)} \Delta l_q = kN \sum_{q=1}^{nL} \sum_{j=1}^{nT} V_{IV}^{(t_j, l)} \Delta t_j \Delta l_q. \quad (28)$$

В таком случае критерий среднего износа примет вид

$$I_{IV} \leq I_{\text{lim}} \Rightarrow \bar{i}_{IV} \leq i_{\text{lim}}, \quad (29)$$

где  $\bar{i}_{IV} = I_{IV} / L$ .

А критерий максимального локального износа задается формулой

$$i^{\text{max}} \leq i_{\text{lim}}. \quad (30)$$

Кривую накопления износа за цикл резания по первому критерию (29), представленную на рисунке 8, можно получить, усреднив по длине ножа профили приращений удельного износа из рисунка 6.



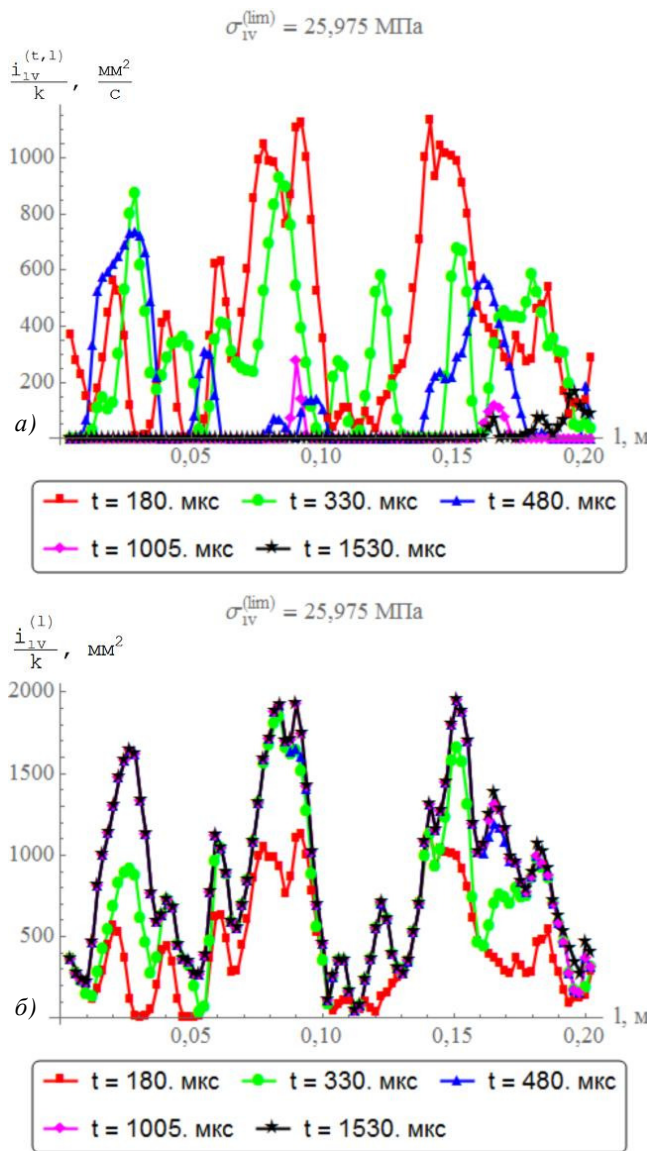


Рисунок 7 – Профили: а – приращений удельного износа; б – удельного износа режущей кромки ножа за цикл резания для расчета 4II

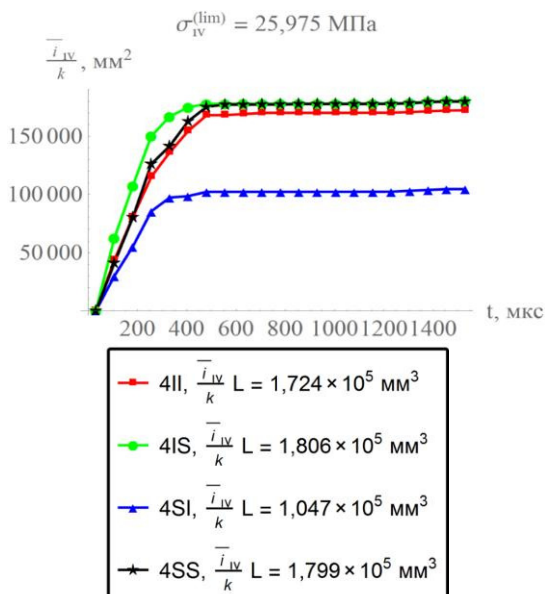


Рисунок 8 – Накопление износа в ноже за цикл резания

Из рисунка 8 видно, что в паре 4SI (стальной брусок/нож из Моники) накопление износа за цикл резания наименьшее. Также износ сравнительно мал для расчета 4II (брусок и нож из Моники).

Подставляя величины удельных к единицам времени и длины опасных объемов  $V_{IV}^{(t,1)}$  в (26) и используя выражение (28), получим профили износа, а также полный износ режущей кромки ножа.

Из рисунка 9 видно, что для критерия (29) полный износ в расчете 4II меньше на 7,4 %, меньше на 11,5 % и больше на 8,9 % полного износа в расчетах 4SS, 4IS и 4SI соответственно. Наименьший полный износ наблюдается в системе 4SI для чугунного ножа и стального противорезающего бруса. В расчетах 4SS, 4IS и 4II полный износ больше чем в расчете 4SI примерно на 17,5, 23 и 8,7 %. Аналогичные в качественном отношении выводы могут быть сделаны и для критерия (30).

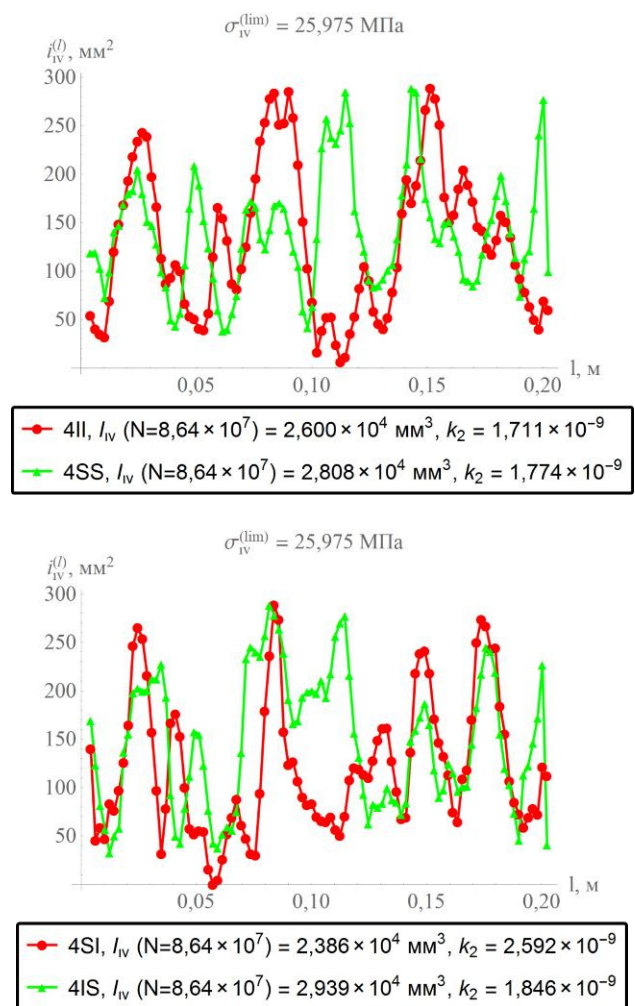


Рисунок 9 – Профили конечного износа ножа для различных комбинаций материалов ножа и бруса, построенные для критерия по максимальному локальному износу (30)

Полученные результаты оценки износа для различных комбинаций материалов ножа и противорезающего бруса свидетельствует о целесообразности их изготовления из Моники.

**Заключение.** Проведено конечно-элементное компьютерное моделирование пространственного напря-



женно-деформированного состояния, состояния объемной повреждаемости системы болты/прижим/нож/основание/противорежущий брус для различных пар материалов и зазоров между режущими поверхностями в динамической постановке с учетом резания зеленой массы.

Предложена методика расчета износа, основанная на модели деформируемого твердого тела с опасным объемом.

Исследование напряженно-деформированного состояния системы показало, что в целом Моника демонстрирует схожую со сталью нагруженность.

Различные комбинации материалов бруса и ножа приводят к значительно большей разнице повреждаемости бруса, чем ножа. Однако при  $\sigma_{lim} = 25,975$  МПа показатели накопления опасного объема  $V_{IV}^{\Sigma t}$  и его интегральной повреждаемости  $\Psi_{IV}^{\Sigma t}$  для расчета  $4I$  в брус (случай наибольшей повреждаемости) в 2,5 и 60 раз меньше чем в ноже. В остальных случаях повреждаемость бруса в  $10^2$ – $10^3$  раз меньше повреждаемости ножа.

Подобная весьма малая повреждаемость бруса по сравнению с ножом может быть обусловлена как большим объемом бруса, так и тем, что значительная часть усилия, создаваемого ножом, расходуется на резание зеленой массы и лишь некоторая его часть передается брусу.

Анализ накопленного по критерию *среднего локального* износа ножа (29) показывает его уменьшение на 7,4–23 % при замене стали на Моника при изготовлении противорежущего бруса и ножа, что может положительно сказаться на увеличении долговечности системы. Наименьший полный износ наблюдается в системе для чугунного ножа и стального противорежущего бруса.

Учитывая невысокую стоимость производства, служебные характеристики Моника, близкие к стальным, ее большую вязкость, обуславливающую лучшее рассеяние волн напряжений и за счет этого меньшую нагруженность системы в целом и, как следствие, меньший износ, является целесообразным ее применение для изготовления ножей и противо-

режущих брусев режущего инструмента сельскохозяйственных комбайнов.

#### Список литературы

- 1 Джонсон, К. Механика контактного взаимодействия / К. Джонсон. – М. : Мир, 1989. – 510 с.
- 2 Горячева, И. Г. Контактные задачи в трибологии / И. Г. Горячева, М. Л. Добычин. – М. : Машиностроение, 1988. – 256 с.
- 3 Сосновский, Л. А. Механика износоусталостного повреждения / Л. А. Сосновский. – Гомель : БелГУТ, 2007. – 434 с.
- 4 Щербаков, С. С. Механика трибофатических систем / С. С. Щербаков, Л. А. Сосновский. – Минск : БГУ, 2011. – 407 с.
- 5 Чугун и сталь в трибофатических системах современных машин и оборудования / Л. А. Сосновский [и др.] // Механика машин, механизмов и материалов. – 2014. – № 4 (29). – С. 5–20.
- 6 Журавков, М. А. Объемная повреждаемость динамически нагруженных элементов режущего инструмента сельскохозяйственного комбайна / М. А. Журавков, С. С. Щербаков, О. А. Насан // Теоретическая и прикладная механика : межвед. сб. науч.-метод. статей. – Вып. 30. – Минск : БНТУ, 2015. – С. 297–305.
- 7 Опасные объемы как мера повреждаемости системы на макро- и микроуровнях / М. А. Журавков [и др.] // Актуальные вопросы машиноведения : сб. науч. тр. – Вып. 4. – Минск : ОИМ НАНБ, 2015. – С. 237–240.
- 8 Archard, J. F. Wear theory and mechanisms. Wear control handbook // J. F. Archard. – New York : ASME, 1980. – 80 p.
- 9 Specht, W. New particulars of Wear of Heavy Railway Carriage Wheels / W. Specht // Glasers Annalen. – 1987. – V. 9. – P. 271–280.
- 10 Журавков, М. А. Некоторые подходы к моделированию контактного взаимодействия движущихся деформируемых тел / М. А. Журавков, С. С. Щербаков // Доклады Национальной академии наук Беларуси. – 2012. – Т. 56. – № 1. – С. 113–123.
- 11 Sherbakov, S. S. Interaction of Several Bodies as Applied to Solving Tribo-Fatigue Problems / S. S. Sherbakov, M. A. Zhuravkov // Acta Mechanica. – 2013. – V. 224. – № 3. – P. 1541–1553.

Получено 10.03.2016

**S. S. Sherbakov, O. A. Nasan.** Volume damageability and wear of knife in the tribo-fatigue system of cutting unit of agricultural harvester.

Finite element simulation of dynamic stress-strain state of multielement cutting unit of agricultural harvester is made with the account of multiple contacts with friction between the knife and base, clamp, green mass; bolts and base, knife, clamp; shearbar and green mass. Distributions of the equivalent von Mises stresses on the cutting surfaces of the knife and shearbar were obtained. Assessment of volume damageability was conducted. Technique of wear calculation and accumulation in the cutting region was developed for two wear criterions basing on the dangerous volumes theory. Comparative analysis of the influence of knife and shearbar combinations of materials (steel and Monica material) on the values of dangerous volumes, integral damageability and accumulated wear of system elements was performed. Calculation results showed that the minimal wear occurs in the system comprised of the knife made of Monica and the shearbar made of steel.