

УДК 669.13.018; 631.352.02

А. А. НОВИКОВ, ОАО «Гомсельмаш», Гомель, Беларусь, В. В. КОМИССАРОВ, кандидат технических наук, Белорусский государственный университет транспорта, Гомель, В. О. ЗАМЯТНИН, П. С. ДРОБЫШЕВСКИЙ, ОАО «Гомсельмаш», Гомель, С. С. ЩЕРБАКОВ, доктор физико-математических наук, Белорусский государственный университет, Минск, Л. А. СОСНОВСКИЙ, доктор технических наук, Белорусский государственный университет транспорта, Гомель

ОЦЕНКА СТОЙКОСТИ НОЖЕЙ ПИТАЮЩЕ-ИЗМЕЛЬЧАЮЩИХ АППАРАТОВ СЕЛЬСКОХОЗЯЙСТВЕННЫХ КОМБАЙНОВ: ТЕОРИЯ, СТЕНДОВЫЕ И ПОЛЕВЫЕ ИСПЫТАНИЯ

Представлены результаты теоретических и экспериментальных исследований ножей питающе-измельчающих аппаратов сельскохозяйственных комбайнов, изготовленных из чугуна ВЧТГ. Показано, что обеспечивается требование к надежной работе данного ответственного элемента.

Введение. Опыт работы предприятий СНГ и дальнего зарубежья показывает эффективность применения бейнитного чугуна с шаровидным графитом (ВЧТГ) в качестве материала деталей машин различного назначения: зубчатых колес, шатунов, распределительных валов, поворотных цапф передней оси подвески, элементов трения-торможения. Применение такого чугуна обеспечивает экономию энергии, уменьшение припусков на мехобработку, снижение массы отливок на ~10 %, а также малое изменение размеров при термической обработке [1–5].

Эксплуатационные характеристики ВЧТГ не только не уступают, но и во многих случаях превосходят многие виды традиционных конструкционных материалов [4, 5].

В 2011–2013 гг. выполняется задание 2.2.10 «Разработка технологии производства высокопрочного чугуна с особыми свойствами для тяжелонагруженных компонентов общемашиностроительного и транспортного применения. Разработка научных принципов и технологий электромагнитного количественного селективного контроля структурных параметров отливок из серого, ковкого и высокопрочного чугунов» Государственной программы научных исследований «Механика, техническая диагностика, металлургия» (ОАО «ГОМСЕЛЬМАШ», ОИМ НАН Беларуси, Межведомственной лабораторией «ТРИБОФАТИКА», и ООО «НПО ТРИБОФАТИКА»). В рамках задания была разработана технология производства высокопрочного чугуна с шаровидным графитом марки ВЧТГ для тяжелонагруженных компонентов сельскохозяйственной техники (патент РБ 15617). Этот чугун имеет высокие механические свойства: предел прочности при растяжении ~ 900–1400 МПа; относительное удлинение при разрыве ~ 1,5–3,5 % (в отдельных испытаниях – 5 %); твердость до 54 HRC. Главная особенность полученного чугуна состоит в том, что его характеристики сопротивления усталости практически достигают таковых для высокопрочной легированной стали (таблица 1).

Испытания по определению прочности, пластичности и твердости высокопрочного чугуна марки ВЧТГ в связи с изменением основного параметра термической обработки – температуры изотермической выдержки выполнялись в соответствии с СТП 315-638–2012 «Методы определения основных механических свойств высокопрочного чугуна с шаровидным графитом».

Таблица 1 – Значения характеристик сопротивления усталости чугуна и стали

Материал	HB _{min}	HB _{max}	Предел контактной усталости, МПа		Предел выносливости при изгибе, МПа	
			P _{fmin}	P _{fmax}	σ _{-1min}	σ _{-1max}
Чугун с шаровидным графитом (ISO 6336-5:2003(E))	200	300	550,0	700,0	210,0	248,0
Легированная термоупрочненная сталь (ISO 6336-5:2003(E))	200	390	706,6	1123,1	302,6	370,6
ВЧТГ (плавка №25)	320	360	900	1050	270	310

Результаты испытаний на растяжение и измерения твердости всех образцов обобщены на представленных диаграммах (рисунки 1, 2). Там же представлены свойства лучших зарубежных аналогов. Видно, что в отмеченных зонах свойства чугуна ВЧТГ значительно выше зарубежных аналогов.

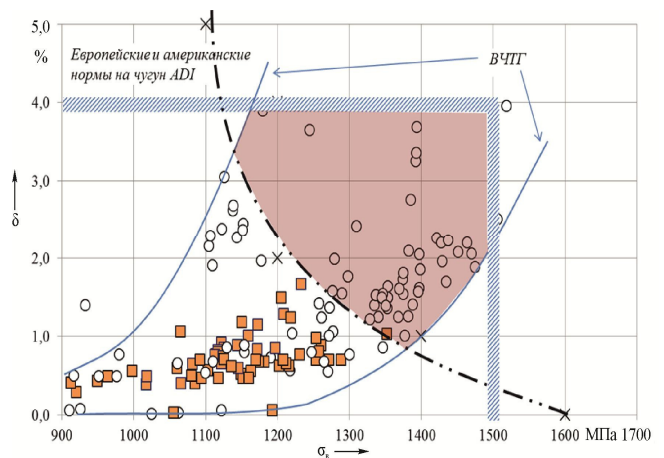


Рисунок 1 – Обобщенная диаграмма пластичность-прочность для многих плавков чугуна ВЧТГ в сравнении с зарубежным чугуном ADI

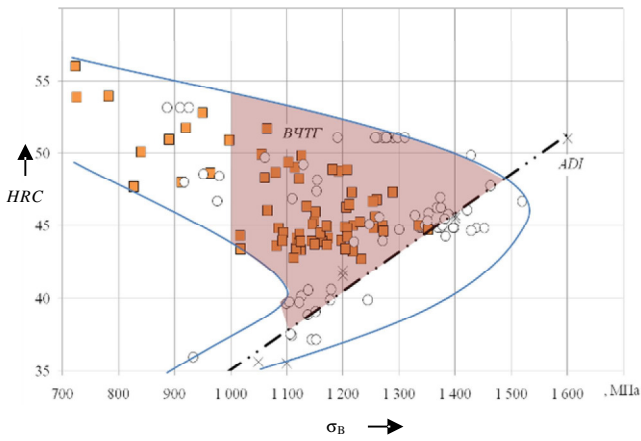


Рисунок 2 – Обобщенная диаграмма твердость-прочность для многих плавок чугуна ВЧТГ в сравнении с зарубежным чугуном АДИ

Установлено, что основные свойства, в известной мере определяющие работоспособность материала, могут варьироваться в следующих интервалах: σ_B от ~ 900 до ~ 1500 МПа, δ – от 0,5 до 4,0 %, твердость – от 37 до 55 HRC.

Трибофатическая система нож – прижим – болты – основание (рисунок 3) является одним из наиболее ответственных узлов режущего барабана комбайна КВК 8060 производства ОАО «Гомсельмаш» (рисунок 4). В данной системе реализуется как контактное взаимодействие с трением ее компонентов, так и изгиб ножа вследствие резания зеленой массы.

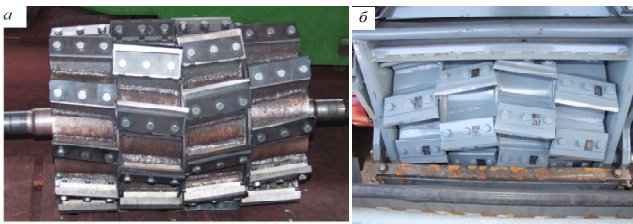


Рисунок 3 – Общий вид измельчающего аппарата кормоуборочного комбайна КВК-8060



Рисунок 4 – Общий вид комплекса кормоуборочного высокопроизводительного КВК-800 и КВК-8060

В рамках работ по замещению импортных стальных ножей системы нож – прижим – болты – основание отечественными ножами, изготовленными из высокопрочного чугуна марки ВЧТГ, возникла необходимость анализа напряженно-деформированного состояния и оценки состояния поврежденности системы с целью ее оптимизации, а также анализ ее эксплуатационной стойкости.

Построение конечно-элементной модели с учетом контактного взаимодействия. Конечно-элементное мо-

делирование системы нож – прижим – болты – основание в трехмерной постановке в соответствии с рисунком 5, а проводилось в пакете ANSYS. Основание жестко закреплено, т.е. на его поверхности S^u заданы граничные условия первого типа

$$u_i = 0. \quad (1)$$

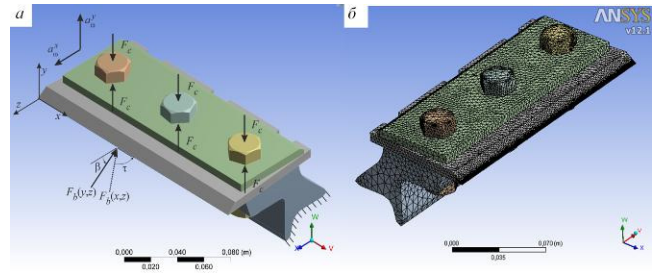


Рисунок 5 – Трехмерная система нож – прижим – болты – основание: а – схема нагружения, б – конечно-элементное разбиение

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 :

$$\sigma_{ij}^k l_j^k = \bar{F}_i^k, \quad (2)$$

где l_j^k – направляющие косинусы.

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

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

$$\sigma_{nn}^k \Big|_{S_{kl}^\sigma} - \sigma_{nn}^l \Big|_{S_{kl}^\sigma} = 0; \quad (4)$$

$$\sigma_{n\tau}^k \Big|_{S_{kl}^\sigma} = \sigma_{n\tau}^l \Big|_{S_{kl}^\sigma} \leq f^{k,l} \sigma_{nn}, \quad (5)$$

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

Состояние поврежденности системы нож – прижим – болты – основание будем оценивать на основе модели деформируемого твердого тела с опасным объемом. Для этого рассмотрим матрицу (тензор) повреждающих напряжений [6–10]:

$$\psi_q = \sigma_q / \sigma_q^{*(lim)}, \quad (6)$$

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

Тогда опасный объем в соответствии с [6–10] имеет вид

$$V_q = \{ dV / \psi_q \geq 1, dV \subset V_k \}, \quad (7)$$

где V_k – рабочий объем тела.

Разбиение на конечные элементы (см. рисунок 5, б) было выполнено таким образом, чтобы наибольшая плотность элементов была на лезвии ножа. В расчетах принимались следующие параметры системы: упругие характеристики 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 (сталь) $\sigma_t = 450$ МПа в предположении, что при пластическом

деформировании болтов напряжения, а следовательно, и осевые усилия, остаются практически неизменными:

$$F_c = \sigma_c \pi r^2 = 59729 \text{ Н}, \quad (8)$$

где r – радиус болта, равный 6,5 мм.

Напряженное состояние, контактное взаимодействие, поврежденность. Пространственное распределение интенсивности напряжений в системе нож – прижим – болты – основание для чугунного ножа при $F_c = 59729$ Н и режущей нагрузке $F_b = 3295$ Н, приложенной посередине лезвия ножа ($l = 0,5L$) под углами $\beta = 30^\circ$, $\tau = 15^\circ$, показано на рисунке 6. Из рисунка видно, что наибольшие напряжения концентрируются в области приложения режущей нагрузки и под головками болтов. В этих областях нормальные напряжения и интенсивность напряжений примерно на порядок больше, чем в остальных частях данной системы. В качественном отношении распределения напряжений и деформаций в системе с чугунным и стальным ножами отличаются незначительно. Значения интенсивности напряжений в области резания примерно на 1 % больше в стальном ноже по сравнению с чугунным ножом. Наибольшие сжимающие напряжения σ_{xx} в области приложения режущей нагрузки приблизительно на 1–2 % больше в чугунном ноже по сравнению со стальным ножом.

Наибольшие растягивающие напряжения σ_{yy} в болтах по абсолютному значению меньше сжимающих напряжений в области приложения нагрузки примерно на 20 и 10 % для чугунного и стального ножей соответственно.

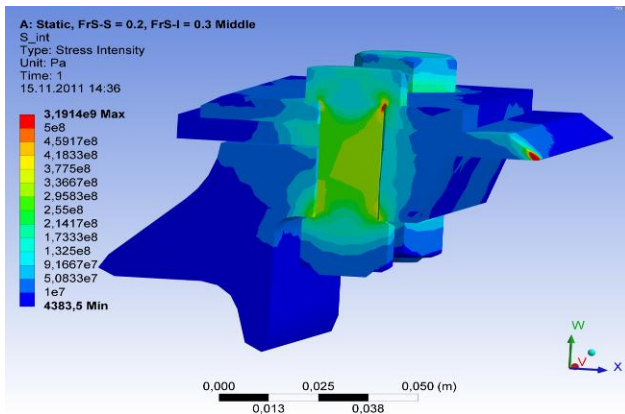


Рисунок 6 – Распределение напряжений σ_{int} в системе нож – прижим – болты – основание для чугунного ножа при нагрузках $F_b = 3295$ Н и $F_c = 59729$ Н

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

Наибольшие значения контактного давления на всех контактных поверхностях системы концентрируются вокруг болтовых соединений. На поверхности контакта прижима и ножа (рисунок 7) значение контактного давления в непосредственной близости от приложенной режущей нагрузки достигает примерно 10 % от максимума. Такое значительное влияние силы резания на вза-

имодействие ножа и прижима свидетельствует о проявлении обратного эффекта в трибофатике [6–10].

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 (рисунок 8).

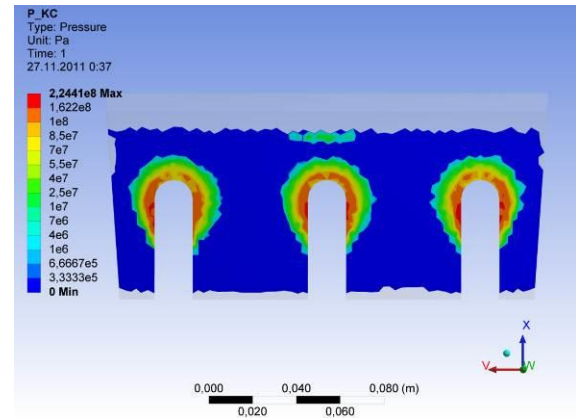


Рисунок 7 – Нормальные контактные усилия между прижимом и ножом в системе нож – прижим – болты – основание при нагрузках $F_b = 3295$ Н, $F_c = 59729$ Н для чугунного ножа

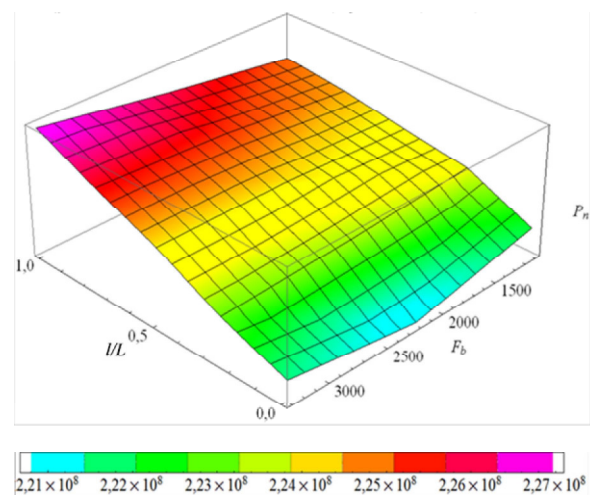


Рисунок 8 – Максимальное значение контактного давления на поверхности нож – прижим в зависимости от величины F_b и ее расположения на режущей кромке при $F_c = 59729$ Н для чугунного ножа

Для реализации расчета опасных объемов создана программа с помощью встроенного в пакет ANSYS языка APDL [11]. Принцип работы программы заключается в следующем. Результатом конечно-элементного расчета является массив средних напряжений и деформаций для каждого i -го элемента. Данный массив используется в дальнейших вычислениях значений поврежденности как отношений действующих и предельных напряжений [11–13]:

$$\psi_{int}^i = \sigma_{int}^i / \sigma_{int}^{lim}. \quad (9)$$

Величины объемов элементов, для которых выполняется условие

$$\psi_{int}^i \geq 1, \quad (10)$$

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 рисунка 9 видно, что при увеличении предельных напряжений σ_{int}^{lim} от 250 до 700 МПа величина опасного объема V_{int} уменьшается примерно в 5,3 раза. Значение V_{int} для стали приблизительно 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.

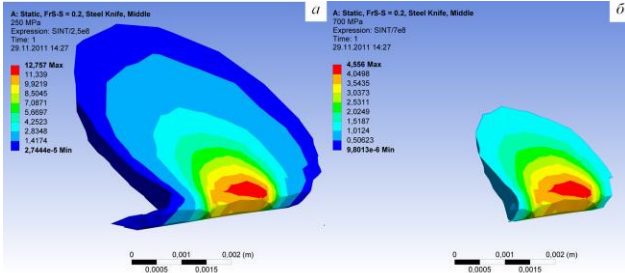


Рисунок 9 – Распределение поврежденности ψ_{int} в опасном объеме стального ножа для разных предельных напряжений: $a - \sigma_{int}^{lim} = 250$ МПа, $b - \sigma_{int}^{lim} = 700$ МПа при нагрузках $F_b = 3295$ Н, $F_c = 59729$ Н, $l = 0,5 L$, $\tau = 15$ и $\beta = 30$

При увеличении режущей нагрузки от 1098 до 3295 Н значения опасных объемов V_{int} возрастают примерно в шесть раз (рисунок 10). Посередине ножа величина поврежденности наименьшая. При $l/L = 1$ она увеличивается примерно на 45 % и при $l/L = 0$ – примерно на 150 % по сравнению с серединой ножа.

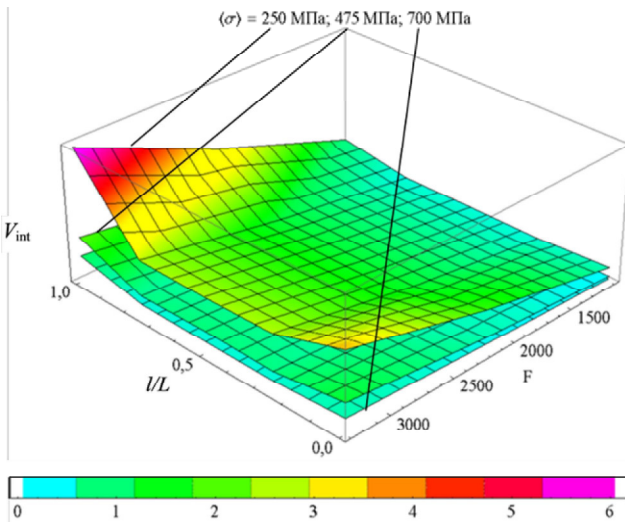


Рисунок 10 – Изменение опасного объема V_{int} (10^{-8} м^3) в чугунном ноже в зависимости от режущей нагрузки и ее положения $0 \leq l/L \leq 1$ для различных значений предельных напряжений

Анализ влияния углов наклона ножа (рисунок 11) показывает, что поврежденность, оцениваемая с помощью V_{int} , принимает наименьшие значения при углах $\beta = 15^\circ$ и $\tau = 5^\circ$, при этом влияние угла τ на величину V_{int} незначительное. При $\tau = 25^\circ$ величина V_{int} уменьшается не более чем на 10 % по сравнению с максимальными значениями при $\tau = 5^\circ$. При $\beta = 15^\circ$ величина V_{int} снижа-

ется примерно в 2,5 раза по сравнению с максимальными значениями при $\beta = 45^\circ$.

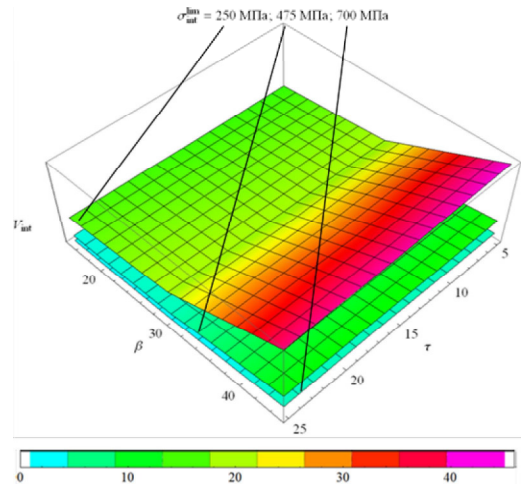


Рисунок 11 – Изменение опасного объема V_{int} (10^{-8} м^3) в зависимости от углов наклона ножа τ и β при $F_b = 3295$ Н, $F_c = 59729$ Н, $l = 0,5 L$

Поскольку работа комбайнов с ножами из чугуна ВЧТГ оказалась эффективной, завод принял решение о крупносерийном их производстве. Это решение реализовано в 2013 г. с большим экономическим эффектом. Фото некоторых разрушенных в процессе эксплуатации стальных элементов режущего барабана кормоуборочных комбайнов приведены на рисунке 12, а, а фото наиболее характерных поврежденных и разрушенных ножей из чугуна ВЧТГ – на рисунке 12, б. Видно, что характер повреждений чугунных ножей носит локальный характер, в то время как стальные ножи в результате единичного повреждения изгибаются, что в конечном итоге приводит к повреждению других деталей измельчающих аппаратов сельскохозяйственной техники.

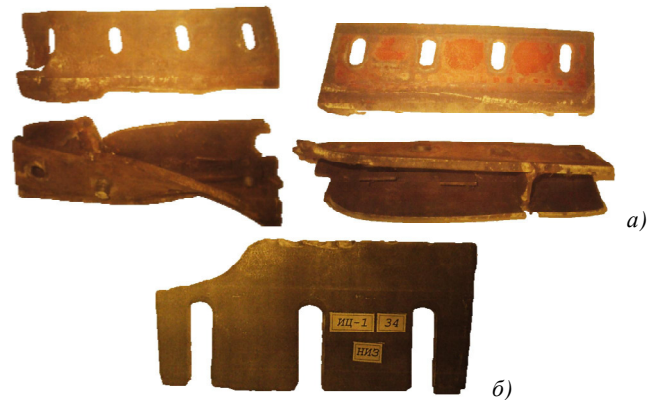


Рисунок 12 – Разрушения стальных элементов (а) измельчающего барабана кормоуборочного комбайна КСК-600 и ножей, изготовленных из чугуна ВЧТГ (б), кормоуборочного комбайна КВК-800

Для краш-тестов использованы дубовые и сосновые бруски, а также стальные стержни $\varnothing 20$ мм твердостью 40 HRC (рисунок 13).

Происходит изгиб кромки стальных ножей, что ведет, как правило, к отделению их крупных фрагментов и далее к разрушению всего режущего аппарата. При работе

чугунных ножей их изгиб не инициируется – возникает только локальное хрупкое разрушение (отделение) относительно мелких кусочков, которые безопасно проходят режущий аппарат и уносятся в почву.



Комбайн КВК-800 (слева) и деревянный брусок со стальным стержнем (справа)



Разрушенные стальной (слева) и чугунный (справа) ножи
Рисунок 13 – Краш-тесты чугунных и стальных ножей

Проведены измерения износа и затупления режущей кромки ножей (рисунки 14–24).

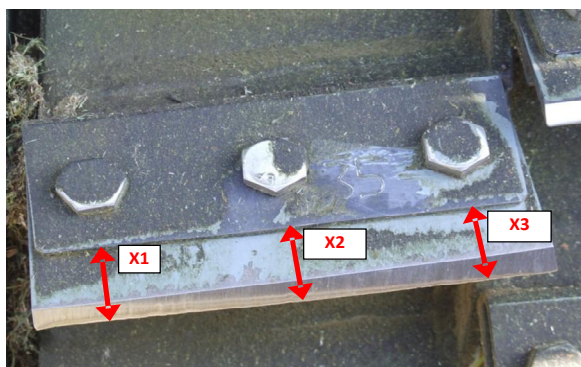


Рисунок 14 – Схема расположения контрольных точек при измерении износа ножей

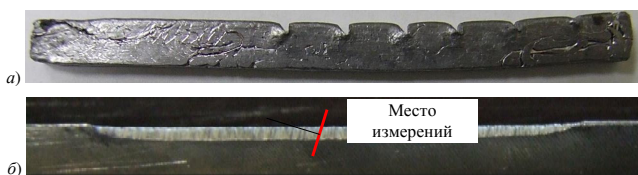


Рисунок 15 – Полученные отпечатки кромки ножа (а) и место проведения измерений (б)

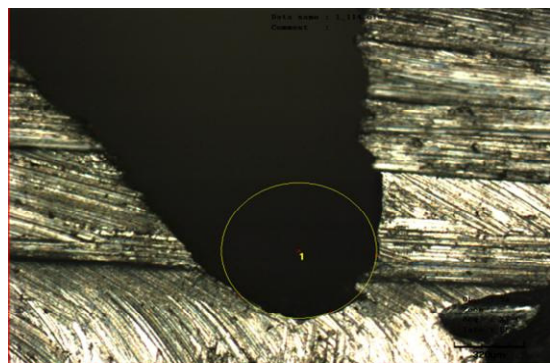


Рисунок 16 – Измеренный отпечаток кромки ножа на микроскопе Olympus LEXT OLS3000

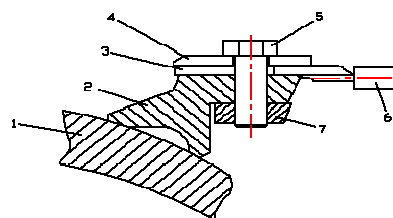


Рисунок 17 – Схема измерения износа:
1 – барабан; 2 – опора; 3 – нож; 4 – прижим; 5 – болт; 6 – штангенциркуль; 7 – пластина

Незаточенные ножи и увеличенный зазор между ножами и противорежущим бруском приводит к высокому расходу топлива, увеличению износа ножей и противорежущего бруса, а также увеличению нагрузки на силовые агрегаты комбайна.

При увеличении радиуса затупления ножей выше рекомендуемого значения (0,1–0,2 мм) происходит увеличение объема металла, необходимого для снятия, что в конечном итоге ведет к повышению времени заточки ножей.

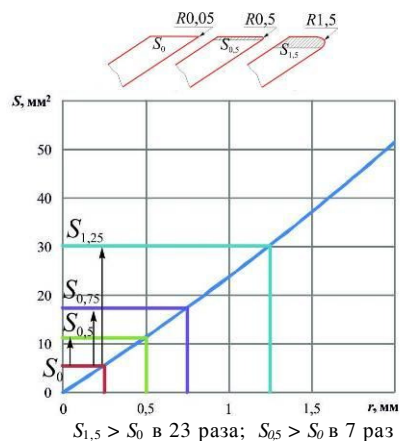


Рисунок 18 – Изменение площади заточки в связи с изменением радиуса режущей кромки ножа

При заточке точило 5 с каждым циклом смещается к центру барабана 1 на расстояние 0,06 мм.

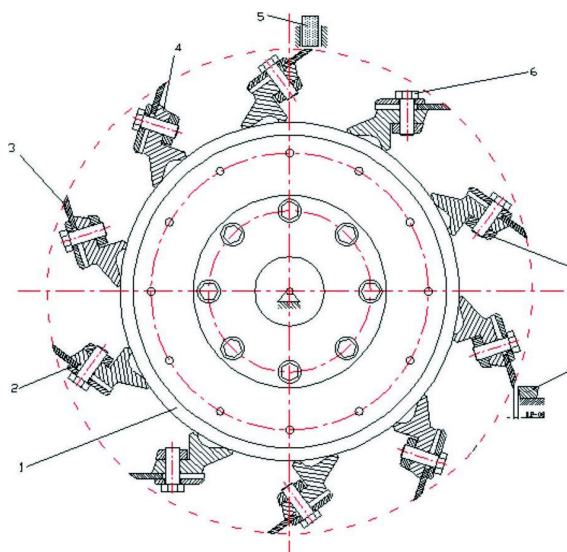


Рисунок 19 – Схема расположения ножей (одно кольцо), заточного устройства и противорежущего бруса измельчающего аппарата кормоуборочного комбайна

Для обеспечения экономии топлива и повышения качества измельчения необходимо ежедневно проводить заточку ножей по 15–20 циклов в зависимости от убираемой культуры с последующей регулировкой зазора между лезвиями ножей и противорежущим брусом.

При радиусе закругления ножей 1,5 мм:

- время заточки увеличивается в 14–16 раз;
- нагрузка на силовые агрегаты возрастает в 3–5 раз;
- расход топлива увеличивается в 1,5–2 раза.

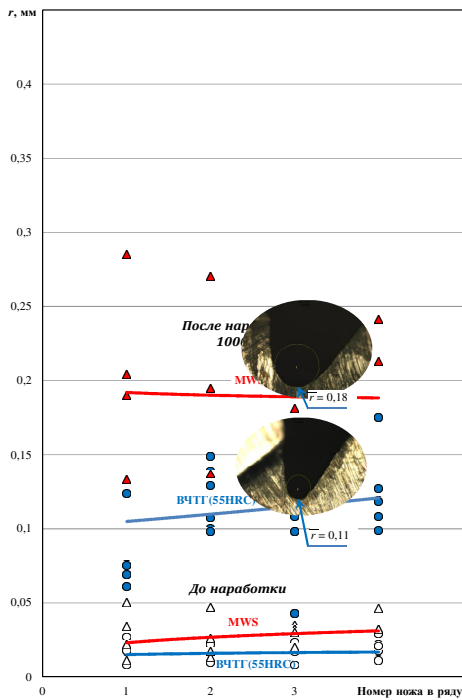


Рисунок 20 – Радиус режущей кромки ножей VCHT(55 HRC) и MWS до и после наработки 1000 т при уборке кукурузы в КДСУП «Боровики»

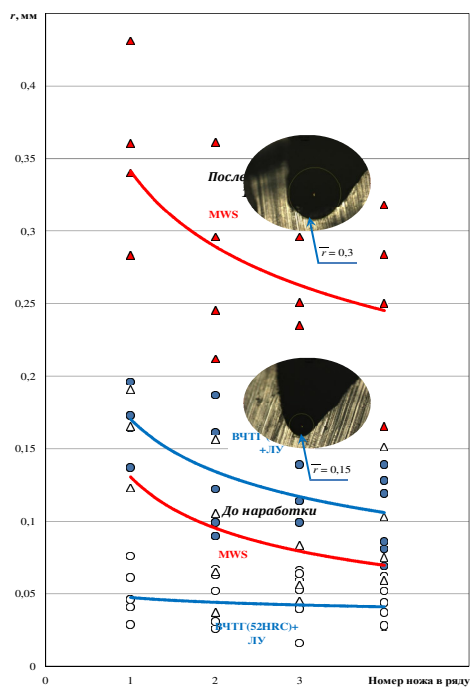


Рисунок 21 – Радиус режущей кромки ножей VCHT(52HRC)+ЛУ и MWS до и после наработки 1000 т при уборке кукурузы в КСУП «Полесье»

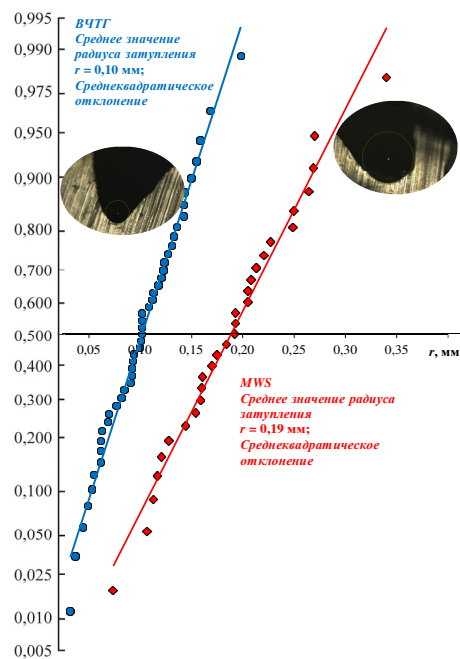


Рисунок 22 – Эмпирические функции распределения радиуса (r) режущей кромки ножей MWS (сталь) и «Гомсельмаш» (чугун VCHT) при наработке по 1000 т кукурузы в двух сельхозпредприятиях

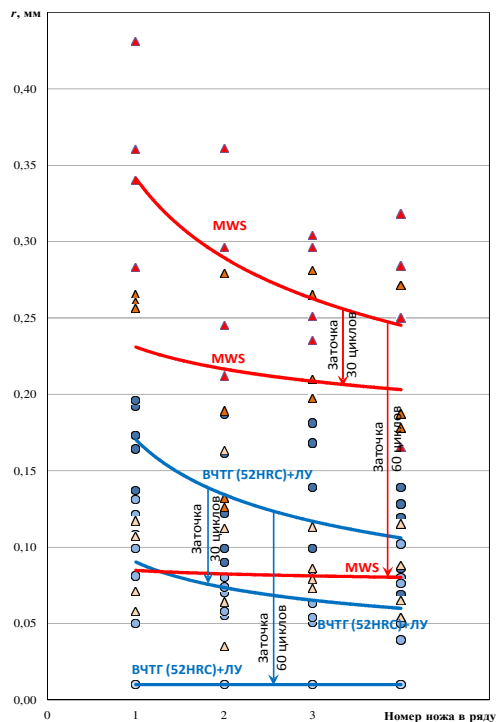


Рисунок 23 – Влияние количества циклов заточки на изменение радиуса (r) режущей кромки ножей MWS (сталь) и «Гомсельмаш» (чугун VCHT) после наработки 1000 т кукурузы в двух сельхозпредприятиях



Рисунок 24 – Характер эксплуатационных повреждений стальных ножей MWS (слева) и чугунных ножей без лазерного упрочнения (справа)

Методика проведения полевых испытаний чугунных ножей на комбайне КВК-800. В ОАО «ГОМСЕЛЬМАШ» была поставлена задача изготовить и апробировать в эксплуатации ножи режущих барабанов, изготовленных из чугуна ВЧТГ. С целью сравнительной оценки стойкости данных ножей в полевых условиях ими были укомплектованы 3 комбайна КВК-800 и реализованы в Гомельскую область. Лабораторией износоусталостных испытаний ОАО «Гомсельмаш» организован надзор за работой этих машин. При этом комплектование ножами было выполнено следующим образом: на ряды 1 и 3 устанавливались ножи из чугуна марки ВЧТГ (47 HRC, $T_{из.в.д.} = 270$ °С), а на ряды 2 и 4 – импортные ножи К81123 (твердость упрочненного слоя 54 HRC). В ходе авторского надзора за эксплуатационными испытаниями опытных партий ножей производилось измерение уменьшения ширины (износ + заточка) режущей кромки ножей из высокопрочного чугуна и стали в зависимости от наработки. Для проведения контрольных замеров была применена схема измерения в трех точках по поверхности ножа от его режущей кромки до опоры барабана с последующим осреднением полученных результатов.

Построение зависимости уменьшения ширины (износ + заточка) режущей кромки ножей в зависимости от наработки (рисунок 25, прозрачные кружочки, закрашенные прямоугольники), позволило выполнить оценку изменения ширины режущей кромки до годовой наработки 30000 т. Видно, что при достижении нормативной наработки ширина ножа из чугуна ВЧТГ уменьшится на 17 мм, а ножа 81123 – на 15,5 мм (разница составляет 10 %). Так как допустимая ширина уменьшения режущей кромки составляет 20 мм, то можно утверждать, что ножи из высокопрочного чугуна ВЧТГ обеспечат наработку в 30000 т.

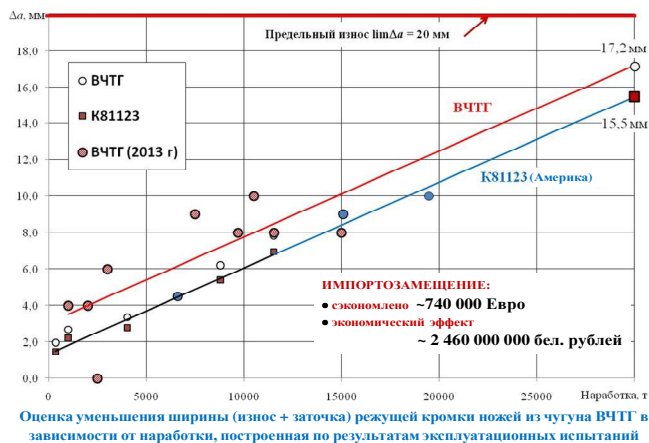


Рисунок 25 – Прогнозная оценка уменьшения ширины (износ + заточка) режущей кромки ножей в зависимости от наработки, построенная по результатам эксплуатационных испытаний и штатной работы

Данные выводы также подтверждаются результатами анализа поврежденности ножей серийного производства по данным выборочного мониторинга сельхозпредприятий (закрашенные кружочки).

Выводы

1 Установлено повышение стойкости чугунных ножей по сравнению со стальными импортными ножами:

после 1000 т. наработки чугунные ножи имеют в 2 раза меньший радиус затупления, чем стальные, при этом они обнаруживаются и меньший разброс (рассеяние) результатов испытаний.

2 В сопоставимых условиях работы для нормальной заточки стальные ножи требуют 60 циклов, тогда как чугунные – 30 циклов.

3 Обеспечивается эксплуатационная наработка чугунных ножей (как и импортных) до ~30 тыс. тонн, что вполне удовлетворяет требованиям. Различие состоит в том, что общий износ режущей кромки у импортных ножей на 15–20 % меньше, чем чугунных. Однако установлено, что после наработки ~30 тыс. тонн износ обоих типов ножей меньше нормативного на 15–28 %. Таким образом, решена задача импортозамещения. Фактическая их эксплуатационная наработка это подтвердила.

4 Обнаруживается мало различающийся характер эксплуатационных повреждений чугунных и стальных ножей.

Представленные результаты расчета трехмерной модели системы нож – прижим – болты – основание и эксплуатационных испытаний ножей из специального чугуна ВЧТГ на кормоуборочных комбайнах КВК-800 в хозяйствах РБ позволяют сделать следующие основные выводы:

5 Разработана методика расчета напряженно-деформированного состояния системы с учетом свойств материала ножа, различной величины силы резания, углов ее приложения.

6 Предложена методика оценки состояний пространственной поврежденности ножа из высокопрочного чугуна в области резания на основе модели деформируемого твердого тела с опасным объемом.

Представлен сравнительный анализ результатов конечно-элементного моделирования.

Список литературы

- 1 Микрюков, В. М. Применение бейнитного высокопрочного чугуна / В. М. Микрюков, О. А. Сазонов // Чугуны с шаровидным и вермикулярным графитом и аустенитно-бейнитной матрицей. Современные материалы для литых деталей: информационный сборник технических материалов / под ред. Н. Н. Александрова [и др.]. – М. : Металлург, 2004. – С. 260–262.
- 2 Шебастинов, М. П. Высокопрочный чугун в машиностроении / М. П. Шебастинов. – М. : Машиностроение, 1988. – 216 с.
- 3 Беликов, А. И. Отливки из высокопрочного чугуна с шаровидным графитом / А. И. Беликов, Л. А. Жуков, Д. Н. Маццарелли. – М. : Машиностроение, 2006. – 448 с.
- 4 Информационный сборник технических материалов «Чугуны с шаровидным и вермикулярным графитом и аустенитно-бейнитной матрицей. Современные материалы для литых деталей» / Н. Н. Александров [и др.]. – М. : Металлург, 2004. – 419 с.
- 5 Валков, К. Прочность и трещиностойкость сферографитных чугунов со структурой бескарбидного нанобейнита : [моногр.] / К. Валков, М. Георгиев. – Пермь : Изд-во Перм. нац. исслед. политехн. ун-та, 2014. – 168 с.
- 6 Sosnovskiy, L. A. Tribo-Fatigue. Wear-Fatigue Damage and Its Prediction / L. A. Sosnovskiy // Series : Foundations of Engineering Mechanics, Springer, 2005. – 424 p.
- 7 Сосновский, Л. А. Механика износоусталостного повреждения / Л. А. Сосновский. – Гомель : БелГУТ, 2007. – 434 с.

8 **Журавков, М. А.** Фундаментальные и прикладные задачи трибофатики / М. А. Журавков // Тр. VI Международного симпозиума по трибофатике (ISTF 2010), 25 окт. – 1 нояб. 2010 г., Минск (Беларусь) / редкол. : М. А. Журавков (пред.) [и др]. – Минск : БГУ, 2010. – Т. 1. – С. 87–96.

9 **Щербаков, С. С.** Механика трибофатических систем / С. С. Щербаков, Л. А. Сосновский. – Минск : БГУ, 2010. – 407 с.

10 **Сосновский, Л. А.** Фундаментальные и прикладные задачи трибофатики : курс лекций / Л. А. Сосновский, М. А. Журавков, С. С. Щербаков. – Минск : БГУ, 2010. – 488 с.

11 **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 Международного симпозиума по трибофатике (ISTF 2010), 25 окт. – 1 нояб. 2010 г., Минск (Беларусь) / редкол. : М. А. Журавков (пред.) [и др]. – Минск : БГУ, 2010. – Т. 2. – С. 393–398.

12 **Журавков, С. С.** Анализ поврежденности силовой системы с помощью модели деформируемого твердого тела с опасным объемом / М. А. Журавков, С. С. Щербаков // Весці НАНБ. Сер. фіз.-тэхн. навук. – 2010. – № 4. – С. 40–43.

13 **Щербаков, С. С.** Контактная задача : анализ опасных объемов / С. С. Щербаков // Проблеми обчислювальної механіки і міцності конструкцій : сб. науч. тр. – Вып. 13. – Днепропетровск : Днепропетровский национальный университет – ІМА-прес, 2009. – С. 279–285.

Получено 25.04.2016

A. A. Novikov, V. V. Komissarov, V. O. Zamyatnin, P. S. Drobyshevskiy, S. S. Sherbakov, L. A. Sosnovskiy. Assessing the strength of knives of the feed-grinding machines agricultural combines theory, bench and field tests.

The results of theoretical and experimental studies of knives of the feed-grinding machines agricultural harvesting equipment, made of cast iron VCHTG. It is shown that is provided by the requirement for reliable operation of the critical elements.