УДК 637.5.01

ДОСЛІДЖЕННЯ МІЦНОСТІ НОЖІВ КУТЕРА ПРИ ДІЇ НА НИХ КОМПЛЕКСНОГО НАВАНТАЖЕННЯ

Некоз О. І., *д.т.н., професор,*
Литовченко І. М., *к.т.н., доцент*
Національний університет харчових технологій,
вул. Володимирська, 68, Київ, 01033
Батраченко О. В.
Черкаський державний технологічний університет,
бул. Шевченка, 460, м. Черкаси, Україна, 18006

Аннотация. *Путем численного моделирования с использованием метода конечных элементов исследовано напряженное состояние ножей куттера. Установлено влияние отдельных факторов нагрузки (лобовое давление на лезвие ножа, боковое давление со стороны сырья, подаваемого чашей куттера, центробежные силы), а также их комплекса на напряженное состояние ножей тех моделей, которые наиболее часто используются на практике. Предложены рекомендации по проектированию ножей куттера.*

Ключевые слова: *куттер, ножи, прочность, расчет.*

THE RESEARCH OF CUTTER KNIVES DURABILITY UNDER THE INFLUENCE OF COMPLEX LOAD

Nekoz O. I., *D.Tech.Sc., professor,*
Litovchenko I. M., *Ph.D., associate professor*
National university of food technologies,
Volodimirskya street, 68, Kyiv, Ukraine
Batrachenko O. V.
Cherkasy state technological university,
Shevchenko blvd, 460, Cherkasy, Ukraine

Abstract. *By means of numerical simulation with the use of finite-element method the stressed state of cutter knives is studied. The influence of individual load factors (frontal pressure on knife blade, lateral pressure from raw material supplied by cutter bowl, centrifugal forces), as well as of their set on stress state of blades of those models which are most frequently used in practice is determined. The recommendations concerning the design of cutter blades are given.*

Keywords: *cutter, knives, durability, calculation.*

Постановка проблеми. Як відомо, від ефективності роботи кутерів залежать якість та кількість виготовленої ковбасної продукції, а параметри роботи кутера значною мірою визначаються конструктивним виконанням його робочих органів – ножів. Для ножів кутера важливою є мінімізація як дійсного, так і кінематичного кута заточування леза, мінімізація товщини корпусу та площі його бокової поверхні. Виконання цих вимог необхідне для якісного тонкого подрібнення м’язової та сполучної тканини м’яса, а також для попередження небажаного нагріву фаршу. В той же час до ножів кутера ставляться суворі вимоги щодо забезпечення їх міцності. Руйнування ножа при роботі машини (максимальна швидкість обертання точок ножа в сучасних моделях кутерів сягає 180 м/с) спричиняє виведення машини з експлуатації на тривалий час і потребує значного обсягу ремонтних робіт.

Забезпечення оптимального виконання усіх вимог до конструкцій ножів є достатньо складною технічною задачею, оскільки технологічна необхідність зменшення товщини та площі бокової поверхні ножів певним чином суперечить вимозі забезпечення їх належної міцності. Незважаючи на численні дослідження роботи кутерів, які проводилися протя-

гом багатьох років, в сучасних умовах вибір основних конструктивних параметрів ножів кутера здійснюється переважно емпіричним шляхом, що вимагає значних витрат часу та матеріальних ресурсів. Застосування такого підходу до розробки конструкцій ножів обумовлено тим, що у відомих літературних джерелах відсутні ґрунтовні емпіричні дані про зусилля, які діють на ножі кутера, та про напружено-деформований стан ножів. Відсутність таких ґрунтовних експериментальних даних, вочевидь, пояснюється технічними складнощами, які необхідно подолати при проведенні зазначених експериментальних досліджень (необхідно знімати показання первинних датчиків про величини деформацій та напружень з ножа, який обертається у м'ясній сировині з частотою до 6000 хв$^{-1}$).

Актуальним завданням є дослідження напружено-деформованого стану ножів кутера з метою створення передумов для прогнозування показників міцності ножа залежно від його конструктивного виконання.

Аналіз джерел. В роботі [1] представлено результати статичних експериментальних досліджень напружено-деформованого стану ножів кутера. Проте застосовані в роботі шляхи моделювання умов навантаження ножа кутера не дозволяють повною мірою відобразити реальні умови його експлуатації – не враховано вплив дії відцентрових сил та не досліджено вплив сумісної дії лобового та бокового тисків на ніж кутера. В роботі відсутні відомості про значення зусиль, які прикладались до ножів. Також у роботі досліджувався напружено-деформований стан тільки одного типу ножів (для кутерів марки Л5-ФКБ), які за своєю конфігурацією істотно відрізняються від тих типів ножів, які в сучасних умовах найбільш представлені на ринку м'ясопереробного обладнання.

В роботі [2] німецькими вченими зазначається про отримані експериментальним шляхом значення зусиль, що діють на ніж кутера, та напружено-деформований стан ножів. Дослідження полягали у проведенні натурного експерименту із використанням модифікованої конструкції кутера та ножів спеціальної будови. Проте в зазначеній роботі не наведено докладних даних про величини зазначених показників.

Відомо про результати досліджень напружено-деформованого стану перфорованих ножів кутера, які отримані шляхом застосування імітаційного моделювання методом скінченних елементів [3]. Проте в роботі [3] не вказано значення зусиль, що були прикладені до ножів, та не проведено ґрунтовного аналізу впливу різних видів навантаження та напружень, що виникають у ножі. В роботі [4] наведено результати чисельного моделювання умов навантаження перфорованих ножів кутера стандартної та розробленої будов. Проте зазначені вище проблемні задачі в роботі також не вирішені.

Відомі результати досліджень німецьких вчених, які в своїй роботі також використали імітаційне моделювання [5] з метою дослідження напружено-деформованого стану перфорованих ножів та розробки їх нових конструкції. Але в роботі відсутні дані про значення зусиль, які були прикладені до ножа, та їх відносну вагу в загальній схемі навантаження, не наведено порівняльного аналізу напружень, що виникли.

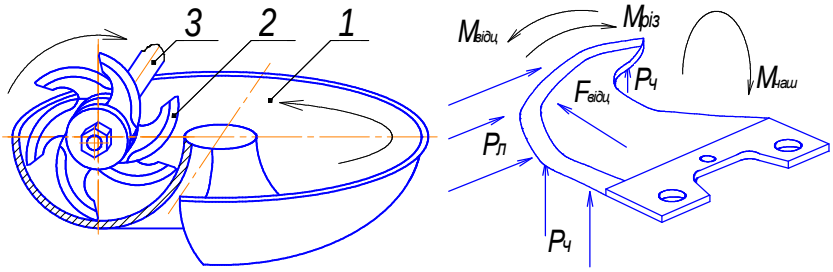
Метою статті є дослідження напружено-деформованого стану ножів кутера з метою створення передумов для прогнозування показників міцності ножа залежно від його конструктивного виконання.

Виклад основного матеріалу досліджень. При роботі кутера на ножі діє низка силових чинників (рис. 1), обумовлюючи при цьому складний напружено-деформований стан ножів. При обертанні ножового вала 3 відбувається процес подрібнення сировини, при цьому на ножі 2 діє сила $P_л$, (рис. 1, б), що включає в себе зусилля різання та лобовий тиск на поверхню заточування леза ножа, а також діють відцентрові сили $F_{відц}$. Внаслідок обертання чаші 1 відбувається подача сировини в зону різання, при цьому на бокову сторону ножа діє сила $P_ч$. (рис. 1, б). Тиск $P_л$ приводить до виникнення згинального моменту $M_{різ}$, який діє в площині ножа. Тиск $P_ч$ приводить до виникнення згинального моменту $M_{чаш}$, який діє в площині, що перпендикулярна площині ножа. Відцентрові сили $F_{відц}$ приводять до виникнення згинального моменту $M_{відц}$, що певною мірою протидіє моменту $M_{різ}$.

Зважаючи на технічні особливості кутерів, які ускладнюють експериментальне визначення напружень, що виникають в ножах під час їх роботи, вважаємо доцільним використання з цією метою чисельних методів (спеціалізованих САПР).

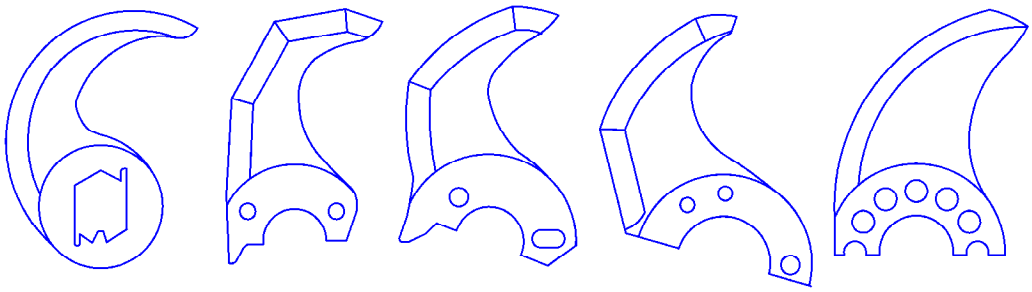
Чисельне моделювання напружено-деформованого стану ножів кутера проводи-

лось за допомогою програмного комплексу T-Flex Analysis. Досліджувався напружено-деформований стан п'яти типів конструкцій ножів (рис. 2), що найчастіше використовуються в сучасних моделях кутерів. Для кожного типу ножа значення напружень, що виникають, визначалися в чотирьох найбільш характерних точках корпусу та леза (рис. 3, а). Кожний тип конструкції ножа досліджувався для випадку застосування як одностороннього заточування леза (рис. 3, б), так і двостороннього симетричного (рис. 3, в).



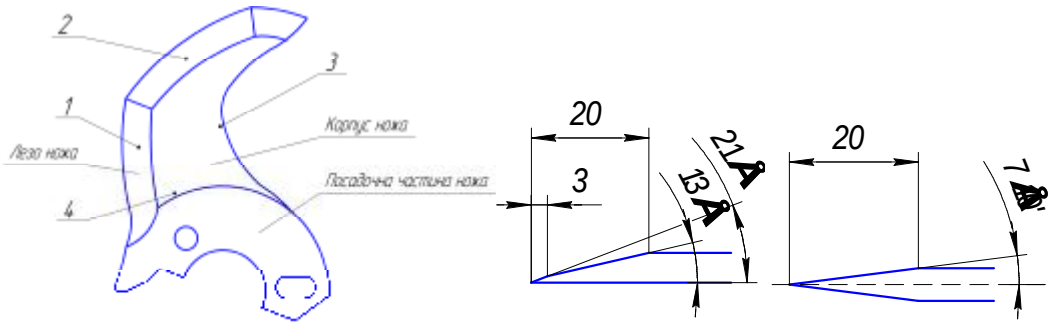
а) б)

Рис. 1. Схеми до визначення зусиль, які діють на ніж кутера при його роботі:
а) схема робочої зони кутера; б) види зусиль, що діють на ніж



а) б) в) г) д)

Рис. 2. Види конструкцій ножів для кутерів марок:
а) Seydelmann (I); б) Laska (II); в) Laska (III); г) Kilia (IV); д) Alpina (V)



а) б) в)

Рис. 3. Параметри ножів кутера:
а) схема розташування точок вимірювання напружень ножа; б) одностороннє ступінчасте заточування леза ножа; в) двостороннє симетричне заточування леза ножа

Моделювання напружено-деформованого стану ножів кутера здійснювалось за етапами:

1) побудова тривимірних моделей ножів досліджуваних типів (товщина ножа – 5 мм, максимальний радіус обертання точок ножа – 300 мм);
2) визначення марки матеріалу моделі (сталь легована, межа текучості – 620,4 МПа; значення межі текучості відповідає марці сталі 65Г, яка широко використовується вітчизняними виробниками для виготовлення ножів кутера);
3) генерування розрахункової сітки (як елементи сітки використано тетраедри (10 вузлів); розмір сітки – 0,02, відносний; радіус покращення – 5; рівень згладжування поверхневої сітки – 3);
4) зазначення закріплення моделі (нерухомими вказано посадочні поверхні ножа,

якими він спирається на планшайбу ножової головки кутера);

5) зазначення виду навантаження та його значення;
6) виконання розрахунку в автоматичному режимі;
7) збереження результатів розрахунку у вигляді звіту та їх аналіз.

Значення лобового тиску визначалося за [6] за умови обертання ножа радіусом 300 мм із частотою 4500 хв$^{-1}$ і задавалося в межах від 0,53 до 2,87 МПа по довжині леза (більшому радіусу обертання ділянок леза відповідали більші значення тиску). Тиск на бокову поверхню ножа приймався рівним 6 кПа [6]. Відцентрові сили визначалися при частоті обертання ножа 4500 хв$^{-1}$.

Напруження в точках ножа визначались як при повній схемі навантаження, так і при врахуванні тільки однієї або декількох з компонент (лобовий тиск на лезо ножа; тиск на бокову поверхню ножа з боку сировини, що подається чашею кутера; лобовий та боковий тиски; комплексне навантаження, що включає в себе усі три види силових чинників). Візуалізацію отриманих результатів для ножа типу V наведено на рис. 4.

Результати моделювання для ножів досліджуваних типів, що виконані з одностороннім заточуванням леза (вид заточування – 1) та двостороннім симетричним заточуванням (вид заточування – 2) подано в табл. 1 і 2.

Таблиця 1

Напруження при врахуванні лобового тиску та тиску подачі чашею

Тип ножа	Вид заточування	Напруження, МПа							
		Номер точки вимірювання (згідно з рис. 3, а) при схемі навантаження							
		Рл				*Рч*			
		1	2	3	4	1	2	3	4
I	1	166,2	177,1	436,6	272,6	2,8	2,4	26,4	40,4
	2	295,8	390,9	793,0	283,7	2,1	1,8	11,4	9,9
II	1	187,5	187,2	302,9	156,4	1,8	1,6	17,1	35,1
	2	370,5	263,8	545,3	240,7	2,8	1,1	7,0	9,4
III	1	72,9	59,4	116,5	200,1	1,3	1,2	11,0	33,6
	2	211,7	193,9	334,4	209,8	1,6	0,6	5,2	6,9
IV	1	82,1	85,2	133,8	140,0	1,1	1,2	10,8	17,6
	2	152,9	149,2	260,5	129,2	1,5	0,4	5,0	6,1
V	1	60,9	65,2	103,1	75,0	1,8	1,6	25,7	16,4
	2	184,5	188,1	302,8	78,1	2,1	0,9	12,1	3,7

Таблиця 2

Напруження при врахуванні лобового тиску та тиску подачі чашею, а також при врахуванні повної схеми навантаження

Тип ножа	Вид заточування	Напруження, МПа							
		Номер точки вимірювання (згідно з рис. 3, а) при схемі навантаження							
		Рл+*Рч*				*Рл*+*Рч*+$F_{відц}$			
		1	2	3	4	1	2	3	4
I	1	99,3	119,2	266,5	160,8	35,9	11,3	102,5	109,9
	2	316,9	376,7	791,3	241,6	254,8	287,5	531,2	262,3
II	1	189,2	176,0	295,6	133,9	173,9	121,5	153,0	179,0
	2	353,8	332,2	549,4	240,4	345,1	305,7	424,4	253,9
III	1	72,7	57,5	114,2	164,9	64,9	30,2	57,4	223,1
	2	206,0	195,3	336,7	214,3	205,4	167,1	260,7	209,4
IV	1	81,2	76,7	143,0	172,1	78,6	52,7	76,6	147,3
	2	158,3	146,2	261,2	134,2	153,2	133,8	174,2	158,8
V	1	59,7	64,3	106,4	80,5	62,2	29,4	50,5	119,3
	2	162,4	191,7	298,4	108,6	196,2	154,4	210,6	107,8

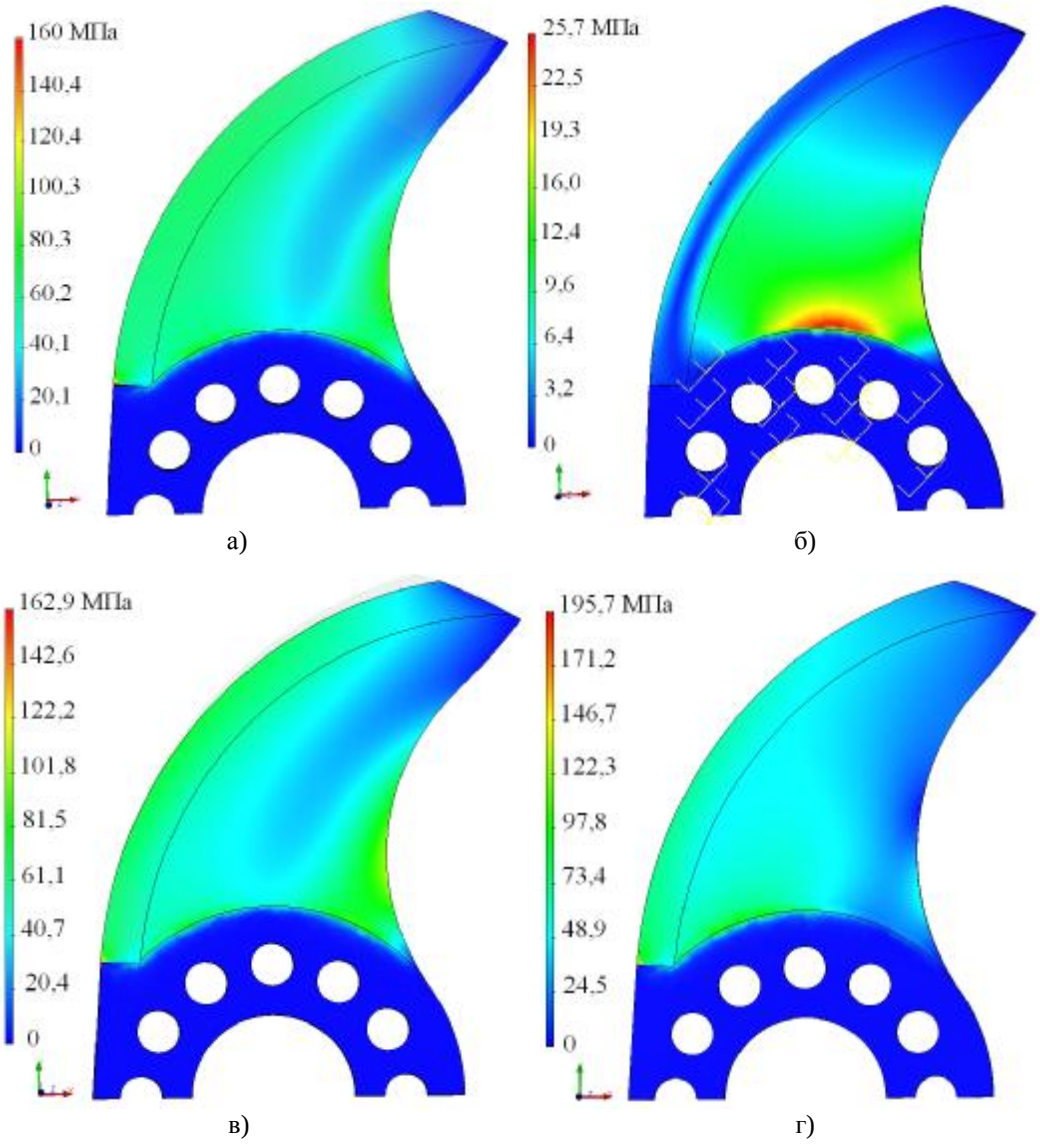


Рис. 4. Візуалізація напружено-деформованого стану ножа марки Alpina, лезо якого має одностороннє заточування, при різних схемах силового навантаження: а) при дії лобового тиску; б) при дії бокового тиску; в) при сумісній дії лобового та бокового тисків; г) при сумісній дії лобового і бокового тисків та відцентрових сил

Висновки. Як випливає з отриманих даних (табл. 1 і 2), геометричні та конструктивні параметри ножа суттєвим чином впливають на його напружено-деформований стан. Так, ножі з більшою площею бокової поверхні (ножі типів III, IV, V) зазнають значно менших напружень в корпусі (точки 3 і 4). Напруження на ділянках леза ножа (точки 1 і 2) суттєвим чином залежать від кута нахилу різальної кромки до напрямку дії лобового тиску, леза з більшим значенням зазначеного кута (більшої кривизни) володіють більшою міцністю (для ножів типів I і II).

Встановлено, що, на відміну від відомих припущень, більшу міцність ножа забезпечує одностороннє заточування леза, а не двостороннє симетричне. Так, напруження при односторонньому заточуванні леза до двох разів менші за напруження при двосторонньому симетричному заточуванні. Це обумовлено тим, що у випадку двостороннього заточування ніж підлягає деформаціям лише в площині його корпусу, до того ж, при односторонньому заточуванні тиск подачі чашею дещо компенсує навантажувальну дію лобового тиску.

Головним силовим фактором, який визначає напружено-деформований стан ножа, є лобовий тиск. Він призводить до виникнення напружень, значення яких на два порядки більші за напруження, що виникають лише під дією тиску подачі сировини чашею. Це пояснюється значно відмінними значеннями

цих тисків (2,8 МПа і 6 кПа), які визначаються швидкостями різання (близько 100 м/с) та подачі сировини чашею (близько 0,6 м/с).

Привертає увагу вплив відцентрових сил на загальний напружений стан ножів. Так, при врахуванні повної схеми навантаження відмічається суттєве (близько двох разів) зменшення напружень в усіх характерних точках ножів порівняно зі схемою навантаження, яка включає в себе тільки лобовий тиск і тиск подачі сировини чашею (табл. 2). Причому вплив відцентрових сил на зміну напружень у характерних точках залежить від конфігурації ножа. Так, для ножів, що мають лезо підвищеної серпоподібності, та корпус, площу бокової поверхні якого на кінці ножа істотно зменшено (ножі типів I і IV), відмічається суттєве зменшення напружень в усіх характерних точках (в тому числі в т. 3 і 4). Тоді як для ножів, площу бокової поверхні корпусу яких не мінімізовано (ножі типів II, III, V), відмічається зменшення напружень в точці 3, але в той же час – збільшення напружень в точці 4. Згідно з отриманими даними при додаванні впливу відцентрових сил напруження в точці 3 ножів типів III і V зменшуються удвічі, а напруження в точці 4 зростають (для ножа типу III – на 36%, для ножа типу V – на 48%). Таке збільшення напружень у місці сполучення передньої частини корпусу ножа із його посадочною частиною можна пояснити підвищеними моментами інерції найбільш віддалених від осі обертання частин ножів зазначених типів. Підвищені значення моментів інерції цих частин ножів визначаються підвищеною площею бокової поверхні корпусу ножа. Зазначений суттєвий вплив відцентрових сил обумовлений значними величинами частоти обертання ножових головок кутерів сучасних моделей (3000÷6000 хв$^{-1}$), в такому разі момент $M_{відц}$ протидіє моментам $M_{різ}$ та $M_{чаш}$ (рис. 1). Отримані дані свідчать про необхідність обов'язкового врахування дії відцентрових сил при розрахунку ножів кутера на міцність.

Цікавим є вплив бокового тиску подачі сировини чашею $P_ч$. Незважаючи на значно менші значення $P_ч$, порівняно з $P_л$, додавання до дії лобового тиску впливу $P_ч$ приводить до істотної зміни напружень у характерних точках, причому характер змін також залежить від конфігурації ножа. Це обумовлюється нормальним (під прямим кутом) напрямком дії $P_ч$ (на відміну від $P_л$), а також значно більшою площею поверхні, на яку діє тиск $P_ч$. Для ножів типу I, II і III додавання впливу $P_ч$ приводить до зменшення напружень в усіх характерних точках (в точках 3 і 4 на величину від 3 до 41%). В той же час для ножів типу IV і V додавання впливу $P_ч$ приводить до збільшення напружень у точках 3 і 4 (на величину від 3,2 до 22,9%). Таким чином, можна зробити висновок, що підвищення площі бокової поверхні корпусу ножа дозволяє зменшити напруження, які виникають під дією $P_л$, але в той же час збільшуються напруження, які виникають при додаванні впливу тиску $P_ч$. Це обумовлює необхідність ретельного вибору конструктивних рішень при пошуку шляхів забезпечення підвищеної міцності ножа.

Наслідком різного впливу силових чинників на напружено-деформований стан ножів є те, що найбільш напружені ділянки для ножів різного конструктивного виконання спостерігаються в різних точках. Для ножів із зменшеною площею бокової поверхні (типу I і II) значення напружень у точці 3 наближаються до значень напружень у точці 4. А ножі типу III, IV, V володіють яскраво вираженою концентрацією напружень у точці 4. Ці дані відповідають даним робіт [7–10], в яких представлено результати експериментальних досліджень причин аварійного руйнування ножів кутера. Зазначена відмінність у розташуванні найбільш послаблених зон у тілі ножа обумовлює різні шляхи підвищення міцності ножів, що мають різну конфігурацію.

Отримані в роботі дані можна використовувати при пошуку раціональних шляхів забезпечення підвищеної міцності ножів кутера.

Список літератури

1. Пахарев А. В. Повышение показателей надежности ножей куттеров путем совершенствования технологии изготовления и восстановления : дисс… канд. техн. наук / А. В. Пахарев. – Саратов : Саратов. гос. аграрный ун-т им. Н. И. Вавилова, 2002. – 170 с.
2. Stoyanov, S. and Hammer, G. (2005). Physikalische Parameter von Braten. *Bundesforschungsanstalt fur Ernahrung und Lebensmittel, Karlsruhe*, (1), pp. 181–183.
3. Закалов О. Вплив форми і розмірів ножів кутера на їх довговічність та енергоспоживання / О. Закалов, А. Бортник // Вісник Східноукраїнського національного університету ім. Володимира Даля. – 2007. – № 1. – С. 152–158.

4. Некоз О. І. Підвищення міцності перфорованих ножів кутера / О. І. Некоз, І. М. Литовченко, О. В. Батраченко, С. О. Філімонов // Обладнання та технології харчових виробництв : темат. зб. наук. праць Донецького нац. ун-ту економіки та торгівлі ім. Михайла Туган-Барановського. – 2011. – № 1. – С. 50–57.
5. Kolev, E. and Stoyanov, S. (2002). Verifikationsmethode zur Bestimmung der Belastung an Bauteilen durch Simulation und Experiment. *Internationales Wissenschaftliches Kolloquium № 47, TU Ilmenau*, (9), pp. 23–26.
6. Некоз О. І. Визначення значень робочих зусиль, що діють на ніж кутера / О. І. Некоз, О. В. Батраченко, С. О. Філімонов, С. І. Микитюк // Обладнання та технології харчових виробництв : темат. зб. наук. праць Донецького нац. ун-ту економіки та торгівлі ім. Михайла Туган-Барановського. – 2012. – № 1. – С. 22–27.
7. Солодихина Н. Сохранение износостойкости куттерных ножей при увеличении числа оборотов ножевого вала / Н. Солодихина, И. Доронин // Молодежь XXI века – будущее российской науки : тезисы докл. 45-й науч.-техн. конф. студентов, аспирантов и молодых ученых, апрель 2011. – ЭПИ МИСиС.
8. Промисловий каталог фірми *Knecht Maschinenbau GmbH* [Електронний ресурс]. – Німеччина, 2013. – Режим доступу : <*www.knecht-gmbh.de*>.
9. Martin Moser. Ermudungsbruch von Fleischhackmessern (Kuttermesser) [Електронний ресурс]. – Німеччина, 2010. – Режим доступу : <http://martin-moeser.de/Veroeffentlichungen/Bruch_Kuttermesser.pdf>.
10. Haack, W., Schnäckel, W. and Wilke, J. (1999). Bearbeitungsvorgänge im Kutter - Konstruktive Voraussetzungen für qualitativ hochwertige Fleischwaren. *Fleischwirtschaft*, (4), pp. 36–40.

References

1. Pakharev, A. V (2002) The increase of indexes of cutter knives reliability by improvement of making and renewal technology. Saratov state agrarian university named after N. I. Vavilov, 170 p. [in Russian]
2. Stoyanov, S. and Hammer, G. (2005) Physikalische Parameter von Braten. *Bundesforschungsanstalt fur Ernahrung und Lebensmittel, Karlsruhe*, (1), pp. 181–183.
3. Zakalov, O. and Bortnik, A. (2007) The influence of form and sizes of cutter knives on their durabulity and energy consumption. *Visnyk Shidnoukrayins'koho natsional'noho universiteta imeni Vladimira Dalya*, (1), pp. 152–158. [in Ukrainian]
4. Nekoz, O. I., Litovchenko, I. M., Batrachenko, O. V. and Filimonov, S. O. (2011) The increase of durability of cutter perforated knives. *Thematic collection of scientific works "Obladnannya ta technologii kharchovyh vyrobnytstv" of Donetsk national university of economy and trade named after Michael Tugan-Baranovskiy*, (1), pp. 50–57. [in Ukrainian]
5. Kolev, E. and Stoyanov, S. (2002) Verifikationsmethode zur Bestimmung der Belastung an Bauteilen durch Simulation und Experiment. *Internationales Wissenschaftliches Kolloquium № 47, TU Ilmenau*, (9), pp. 23–26.
6. Nekoz, O. I., Batrachenko, O. V., Filimonov, S. O. and Mikityuk, S. I. (2012) The determination of values of workings efforts which act on cutter knives. *Thematic collection of scientific works "Obladnannya ta technologii kharchovyh vyrobnytstv" of Donetsk national university of economy and trade named after Michael Tugan-Baranovskiy*, (1), pp. 22–27. [in Ukrainian]
7. Solodikhina, N. and Doronin, I. (2011). Saving of wearproofness of cutter knives at the increase of a number of turns of knife billow. Theses of lectures of 45th scientific and technical conference of students, graduate students and youths of scientists «Molodezh XXI veka – budushee rossijskoj nauki», EPI MISiS. [in Russian]
8. Industrial catalogue of Knecht Maschinenbau GmbH firm (2013). Available at: <www.knecht-gmbh.de>.
9. Martin Moser (2010) Ermudungsbruch von Fleischhackmessern (Kuttermesser) Available at: <http://martin-moeser.de/Veroeffentlichungen/Bruch_Kuttermesser.pdf>.
10. Haack, W., Schnäckel, W. and Wilke, J. (1999). Bearbeitungsvorgänge im Kutter - Konstruktive Voraussetzungen für qualitativ hochwertige Fleischwaren. *Fleischwirtschaft*, (4), pp. 36–40.