

Рисунок 2 – Структура покрытия, содержащего 25% Al_2O_3 в смеси порошков, $\times 163$

Исследования триботехнических свойств производились на базе Белорусского национального технического университета и Объединенного института машиностроения НАН Беларуси. Триботехнические испытания образцов с определением коэффициента трения проводились на автоматизированном трибометре АТВГП, оснащенный специально разработанным устройством для регистрации коэффициента трения. Оценка сопротивления контактному разрушению покрытий осуществлялась в условиях трения без смазочного материала (сухое трение). Результаты изменения коэффициентов трения в зависимости от количества циклов нагружения приведены на рисунке 3.

Заключение. Практически во всех случаях коэффициенты трения сначала линейно возрастают, потом начинают уменьшаться, зачастую превышая значения коэффициенты трения в чистом самофлюсе СР4 при тех же циклах нагружения. Это связано с методикой проведения испытаний: так как испытания проводились в условиях без смазки (самый жесткий режим), а в матрице покрытия присутствуют включения Al_2O_3 , наблюдается «вырывание» частиц из

покрытия, чем и объясняется повышение коэффициентов трения на начальном этапе, соответствующем периоду приработки. Далее наблюдается тенденция к снижению коэффициентов трения.

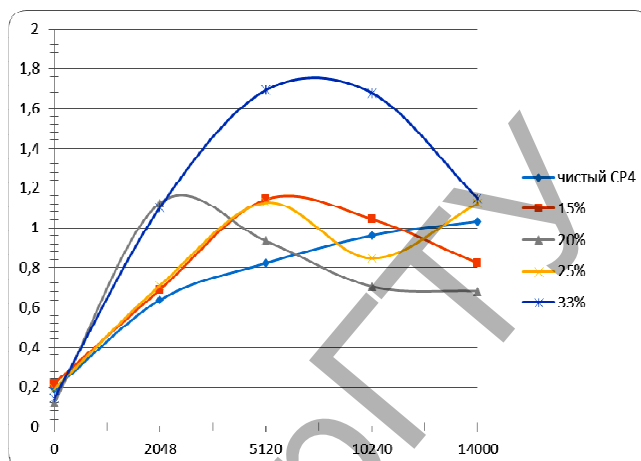


Рисунок 3 – Изменение коэффициентов трения в зависимости от количества циклов

На эксплуатационные характеристики покрытия это не будет оказывать заметного влияния, так как эксплуатируются детали в условиях трения со смазкой и контактируют с более мягким материалом – медью. Это подтверждается результатами испытаний на относительную износостойкость. Можно полагать, что данные покрытия будут обладать высокой износостойкостью, что делает их перспективными для тяжело нагруженных узлов трения.

СПИСОК ЦИТИРОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Kotkunde, N. Review of laser cladding on steel / N. Kotkunde, H. Ojha // International J. of Multidiscipl. – Research & Advcs. in Engg. – IJMRAE. – Vol. 3. – No. II. – April 2011. – P. 25–34.
2. Калиниченко, А.С. Влияние содержания оксидной керамики на структуру и свойства никельхромовых плазменных покрытий / А.С. Калиниченко, О.Г. Девойно, В.В. Мешкова // Современные методы и технологии создания и обработки материалов: сб. научных трудов в 3 кн. – Кн. 2: Технологии и оборудование механической и физико-технической обработки / Редколлегия: С.А. Астапчик (гл. ред.) [и др.]. – Минск: ФТИ НАН Беларуси, 2015. – С. 171–174.

Материал поступил в редакцию 30.10.2017

KALINICHENKO A.S., MESHKOVA V.V., DEVOINO O.G. Wear resistance of composite coatings made of self-fluxing nickel-chromium powders containing a ceramic phase

The influence of structural features of coatings formed on steel specimens by means of plasma spraying of a mixture of nickel-chromium base powder and different percentage of oxide ceramics one on the coatings wear resistance is investigated.

УДК 539.3

Веремейчик А.И., Гарбачевский В.В., Сазонов М.И., Хвусевич В.М.

РАЗРАБОТКА ТЕХНОЛОГИИ ПОВЕРХНОСТНОЙ ПЛАЗМЕННОЙ ЗАКАЛКИ НОЖЕЙ ДЛЯ ИЗМЕЛЬЧЕНИЯ ПИЩЕВЫХ ПРОДУКТОВ

Введение. В пищевой промышленности широко используются установки для измельчения пищевых продуктов. Производитель-

ность и ресурс этих установок определяется ножами, вращающимися с большой скоростью. Данная статья посвящена исследованию

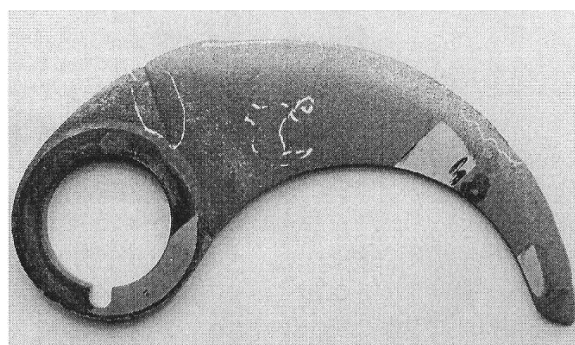
Веремейчик Андрей Иванович, к.ф.-м.н., доцент кафедры прикладной механики Брестского государственного технического университета.
Гарбачевский Виталий Владимирович, м.т.н., старший преподаватель кафедры прикладной механики Брестского государственного технического университета.

Сазонов Михаил Иванович, д.т.н., профессор, профессор кафедры прикладной механики Брестского государственного технического университета.

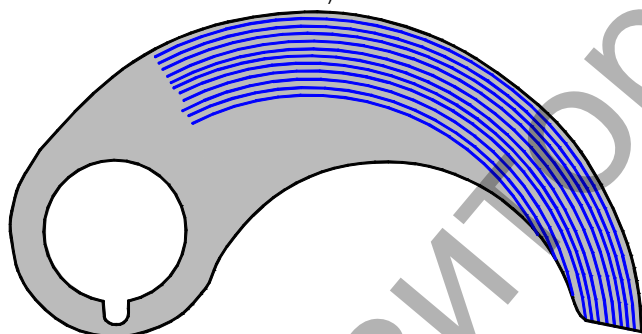
БрГТУ, 224017, г. Брест, ул. Московская, 267.

особенностей износостойкости, причин появления коррозии, растрескивания и образования и развития шейки в зоне крепления ножа к валу. Разработана математическая модель ножа и исследован относ его элементов. Изучены температурные поля от движущегося высокоинтенсивного источника нагрева. Предложен процесс поверхностной плазменной закалки и создана плазменная установка, определены оптимальные параметры упрочнения. Срок эксплуатации измельчителей пищевых продуктов (ножей) увеличен в 2,3 раза.

1. Исследование износостойкости измельчителей пищевых продуктов и разработка основ технологии поверхностной плазменной закалки (ППЗ). Ножи, используемые при измельчении пищевых продуктов на универсальных куттерах немецкой компании «Stephan», изготовлены из хромистой жаропрочной нержавеющей стали 14X17H2 ГОСТ 5632—2014 и упрочнялись объемной закалкой. В результате эксплуатации измельчители подвергались механическому, ковитационному и коррозионному изнашиванию и имели короткий срок эксплуатации (рисунок 1, а).



а)



б)

а) после эксплуатации с упрочнением объемной закалкой; б) до эксплуатации после ППЗ

Рисунок 1 – Измельчители пищевых отходов

Нож имеет плоскую серпообразную форму толщиной $t = 8$ мм (рисунок 2). В процессе изготовления деталь подвергалась объемной закалке до величины твердости 42 – 48 HRC. В установке используются две детали, которые установлены в горизонтальном положении на вращающемся валу емкости, в которую загружаются куски твердого сыра общей массой $m = 70$ кг.

Заточенная под углом 21° кромка детали обращена вниз. В емкость подается пар с температурой $T = 150$ °С (после размельчения и расплавления сыра часть его остается под поверхностью детали). Ведущий вал вращается с высокой скоростью, совершая $n = 740 - 1480$ об/мин. Один цикл нагружения при стационарном режиме $t = 7$ мин; и с учетом времени перегрузки установки за сутки деталь нагружается $N = 25 \div 40$ раз. Долговечность детали не превышала 3 месяца, поэтому разрушение материала является малоцикловым и это свидетельствует о наличии нагрузок большой интенсивности.

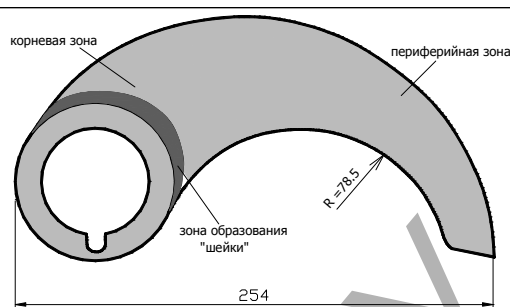


Рисунок 2 – Эскиз детали

Визуальные обследования после эксплуатации показали ряд типичных дефектов – поверхностная коррозия металла, затупление, растрескивание и выламывание режущей кромки, разрушение полотна детали, отламывание кусков в периферийной зоне. В зоне примыкания детали к утолщению с посадочным отверстием отмечено появление «шейки».

С помощью лазерного профилометра для изучения характера износа построены профилограммы детали, из которых видно, что произошел значительный износ материала (порядка 10 – 20% общей массы детали). Толщина детали в сечениях наиболее удаленных от оси вращения уменьшилась из-за большей окружной скорости в этих сечениях ножа примерно в два раза, при этом его поверхность не подверглась деформации и осталась плоской.

Ввиду слоистости структуры определены механические характеристики образцов вдоль и поперек слоев. Прочность материала вдоль волокон на $17 \div 12\%$ выше прочности материала поперек волокон, что должно быть учтено при производстве детали.

Эксперименты показали, что из-за высоких градиентов напряжений при объемной закалке появляются трещины на глубину до 3,7 мм. Таким образом, проблема повышения надежности и долговечности детали может быть решена 2-мя путями:

- анализом напряженного состояния с разработкой рекомендаций для оптимизации геометрии детали;
- использованием поверхностной плазменной закалки для создания поверхностного слоя измельчителя с высокой твердостью и износостойкостью.

Анализируя характер работы установки, имеющихся механических повреждений, можно сделать вывод, что касательные силы инерции не влияют на работоспособность детали. Кроме того, на отработавших свой ресурс деталях замечены характерные дефекты, которые также позволяют сделать вывод о характере и уровне действующих нагрузок.

Проведены исследования износостойкости детали машины для измельчения пищевого сырья. С помощью программного обеспечения измерительного комплекса MINSTRAL 070705 создана модель фигуры детали (рисунок 3). На основании полученных данных для анализированных фрагментов четырех деталей построены кривые, описывающие геометрию исследуемой части детали в соответствующих плоскостях А – F.

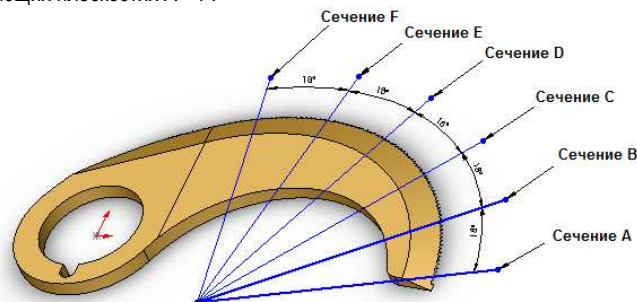


Рисунок 3 – Компьютерная модель детали с положением секций плоскостей

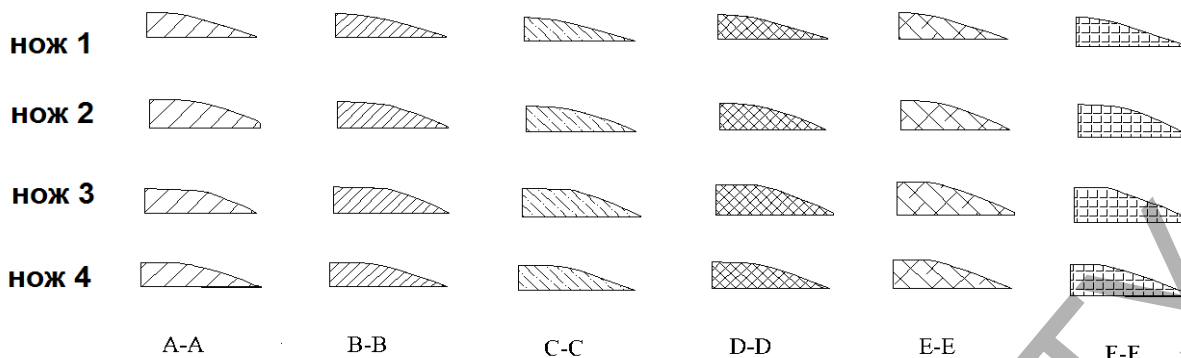


Рисунок 4 – Сечения, соответствующие плоскостям А – F для ножей 1–4

На генерированных кривых строились соответствующие поверхности. Базируясь на полученных поверхностях, создавались элементы фигур анализируемых вырезов соответствующих деталей. На рисунке 4 показаны соответствующие сечения исследуемых деталей.

С помощью программы AutoCAD вычислены площади сечений. В таблице 1 показаны результаты вычислений.

Таблица 1 – Значения площадей сечений

Плоскость „m” № детали „n”	A	B	C	D	E	F
1	95,1269	103,0503	94,6223	101,2618	109,8725	118,9291
2	92,6127	101,4331	91,9913	98,8796	105,5053	117,8067
3	89,5463	94,318	87,4971	88,0906	98,2464	116,8712
4	81,5463	76,9118	73,4262	77,951	81,6569	90,6322

Для осуществления процесса поверхностной плазменной закалки в комплексе с установкой был разработан специальный манипулятор, при помощи которого осуществляется перемещение детали относительно плазменной дуги с заданной скоростью (угловая скорость стола манипулятора может регулироваться в пределах 0,5-180 об/мин). Упрочняемая деталь располагалась на столике манипулятора горизонтально и осуществлялось нанесение плазменных дорожек с шагом 1,5-2,0 мм (рисунок 1, б). Рабочие параметры устанавливались следующим образом: ток дуги I=28А, расход плазмообразующего газа (аргон) Q_{Ar}=1,2л/мин, расход защитного газа (азот) Q_{N2}=3,6л/мин, относительная скорость перемещения детали V=10 мм/с.

Микротвердость поверхности детали увеличена до 466–600 HV_{0,1}. Экспериментально подтверждена возможность закалки при наложении соседних дорожек друг на друга с расстояниями между их осями, равном 0,4 мм; при этом микротвердость составила 532 – 566 HV. Упрочненные таким способом детали установлены на длительные испытания.

В силу конструктивных особенностей деталь имеет режущую кромку с соответствующим углом заточки. Для упрочнения режущей кромки сначала выполнялся раскрой заготовок по существующей технологии. Затем осуществлялся процесс ППЗ заготовок по разработанной методике. Заключительной операцией являлась механическая заточка заготовок для образования режущей кромки измельчителя.

Для вычисления критерия износа детали Φ_{nm} воспользуемся следующей формулой:

$$\Phi_{nm} = \frac{S_{1m} - S_{nm}}{S_{1m}} \cdot 100\%, \quad (1)$$

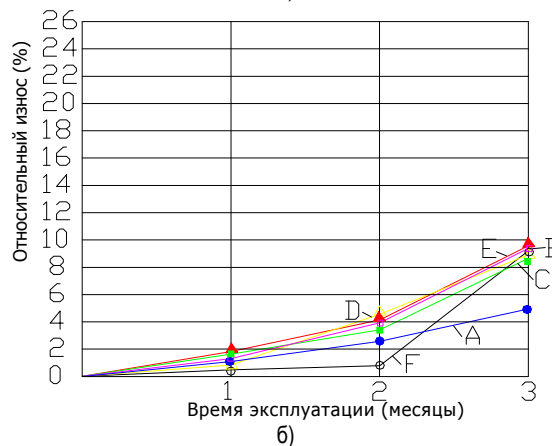
где Φ_{nm} – относительный процент износа детали, S_{nm} – поле поверхности анализируемого сечения для соответствующей детали n в соответствии с плоскостью m; n – номер детали (n=1, 2, 3, 4, 5).

Используя формулу (1), вычисляем коэффициенты износа детали для соответствующих элементов детали и секущей плоскости. В таблице 2 приведены результаты вычислений.

Таблица 2 – Значения относительных площадей сечений

Плоскость „m” № детали „n”	A	B	C	D	E	F
1	0	0	0	0	0	0
2	2,642996	1,569331	2,780528	2,352516	3,974789	0,943756
3	5,866479	8,473823	7,530149	13,00708	10,58145	1,730359
4	14,2763	25,3648	22,40074	23,02033	25,68031	23,79308

По полученным данным построены графики относительного износа элементов детали, упрочненной объемной и поверхностной закалками (рисунок 5 а, б).

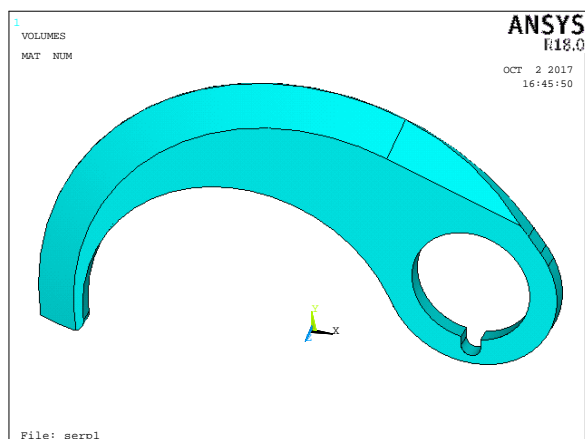


а) объемной закалкой; б) поверхностной закалкой
Рисунок 5 – Графики относительного износа измельчителей из стали 14X17H2, упрочненных

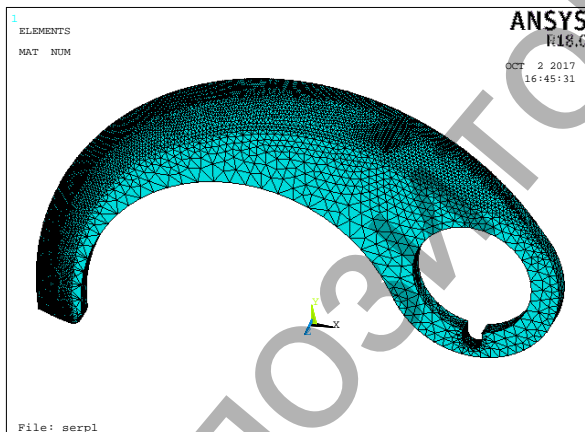
Анализируя полученные зависимости, можно заключить, что износоустойчивость измельчителей, упрочненных путем ППЗ, в 2,3 раза выше, чем износоустойчивость измельчителей, упрочненных объемной закалкой.

2. Методика исследований температурных полей при поверхностной закалке рабочей зоны. Проведено исследование нестационарных температурных полей при поверхностной закалке, выполненное с применением конечно-элементного комплекса ANSYS. Следует отметить, что основой термического анализа в пакете ANSYS является уравнение теплового баланса, которое получается из принципа сохранения энергии. Конечно-элементное решение заключается в получении значений узловых температур и напряжений, на основе которых вычисляются остальные необходимые величины [1].

В ходе проведения вычислительного эксперимента разработана трехмерная модель измельчителя, приведенная на рисунке 6.



а)



б)

Рисунок 6 – Трехмерная модель ножа (а) и схема разбиения конечными элементами (б)

При решении температурной задачи в ANSYS использовался предназначенный для анализа переходных процессов восьмизуловой термический элемент SOLID70 (Thermal Mass Solid Brick 8node 70), который имеет одну степень свободы (температура в каждой точке). Модель разбивалась на 53572 конечных элемента. В соответствии со скоростью движения плазменной струи к узлам дискретной модели ножа пошагово последовательно прикладывалась температурная нагрузка в виде конвекции. Во избежание оплавления максимальная температура поверхности ножа должна быть на 3...5 % меньше температуры плавления стали (~1400 °C). На всех поверхностях модели задавалась конвекция, т. к. температура плазменной струи в центре составляет около 20000 °C. Известно [1], что тепловой поток плазменной струи распределяется по ширине пятна нагрева по закону,

близкому к кривой вероятности Гаусса. Исходя из этого, на той поверхности, по которой движется плазменная струя, коэффициент конвекции задавался различным по ширине пятна нагрева, соответствующим нормальному распределению. Его значение выбиралось таким образом, чтобы максимальная температура на нагреваемой поверхности не превышала 1350 °C.

На рисунке 7 приведено распределение температуры по пятну нагрева.

Функции температуры и коэффициента конвекции имеют следующий вид:

$$T(x, y, t) = \frac{T_0}{10^{-3} \left[\left(R \cdot \cos\left(\frac{v}{R}t - 0,122\right) + x \right)^2 + \left(R \cdot \sin\left(\frac{v}{R}t - 0,122\right) - y \right)^2 \right] + 1} + T_H, \quad (2)$$

$$k(x, y, t) = \frac{k_0}{10^{-3} \left[\left(R \cdot \cos\left(\frac{v}{R}t - 0,122\right) + x \right)^2 + \left(R \cdot \sin\left(\frac{v}{R}t - 0,122\right) - y \right)^2 \right] + 1},$$

где $T_0=20\ 000$ °C – температура в центре плазменной струи, $R=0,13$ м – радиус кривизны траектории движения плазменной струи, определяемый из геометрии режущей кромки ножа, $V=10$ мм/с – скорость движения плазматрона, $T_H=20$ °C – температура окружающей среды, $k_0=7\ 000$ °C – коэффициент конвекции в центре плазменной струи.

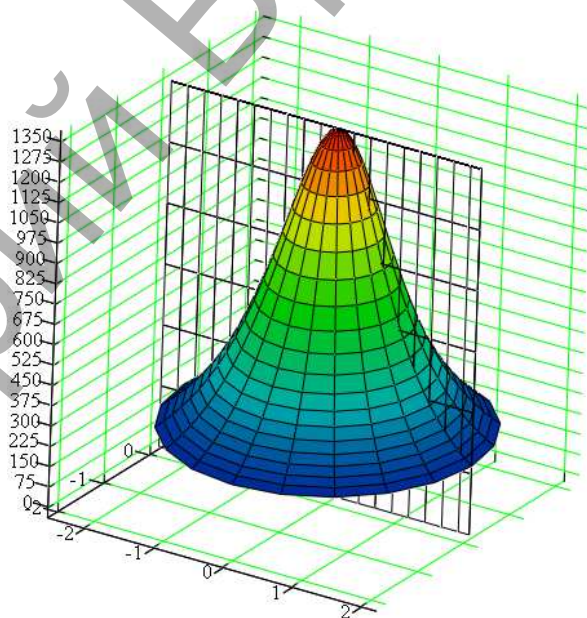
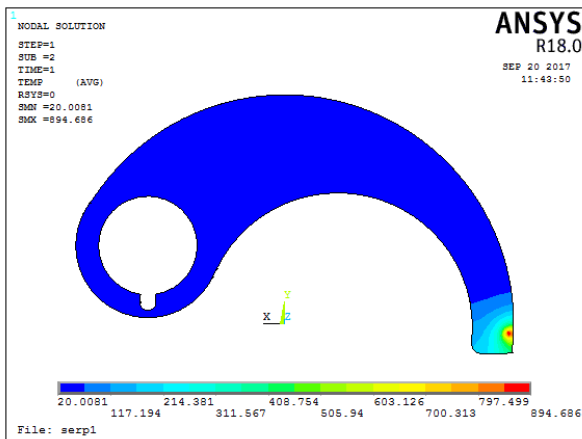


Рисунок 7 – Распределение температуры в пятне нагрева

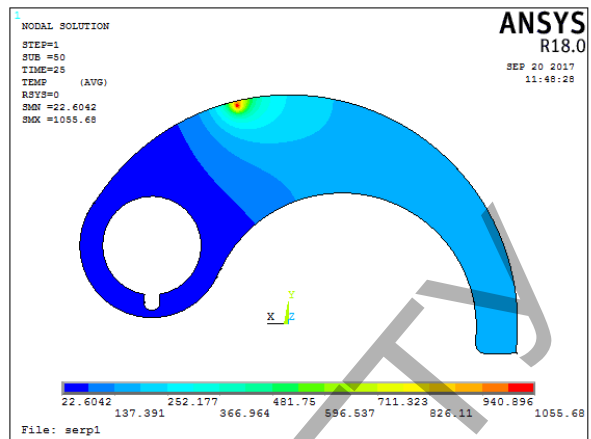
Удельная теплоемкость стали принималась зависящей от температуры и при температурах 0...1300 °C находилась в интервале $c_{ст} = 400...600$ Дж/(кг·K) [5]. Время движения t определялось в зависимости от длины дуги режущей кромки при скорости движения плазматрона $V=10$ мм/с. Некоторые характеристики материала приведены в таблице 1.

После каждого шага нагружения проводился расчет температурных полей, результаты которого записывались в LS-файлы. Для получения общего решения выполнялось совместное решение по определенному количеству LS-файлов, соответствующее 13 шагам нагружения. В результате проведения расчета определены поля температур в различные моменты времени.

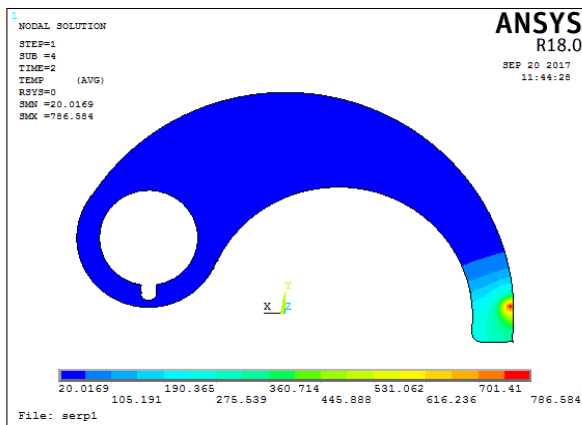
На рисунке 8 представлено распределение температурных полей на рабочей зоне измельчителя в различные моменты времени при скорости движения пятна нагрева $V=10$ мм/с.



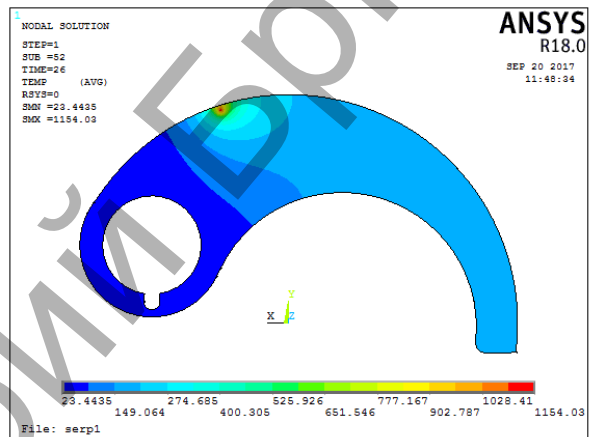
а)



д)



б)

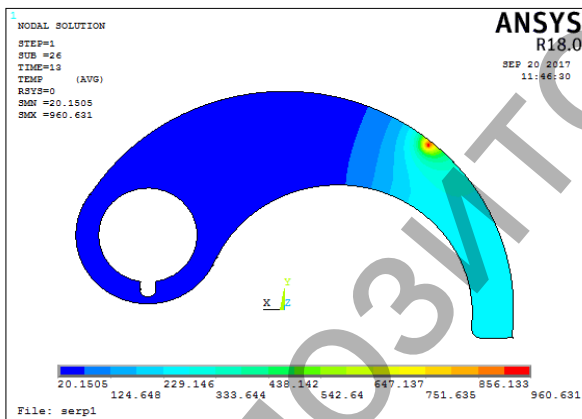


е)

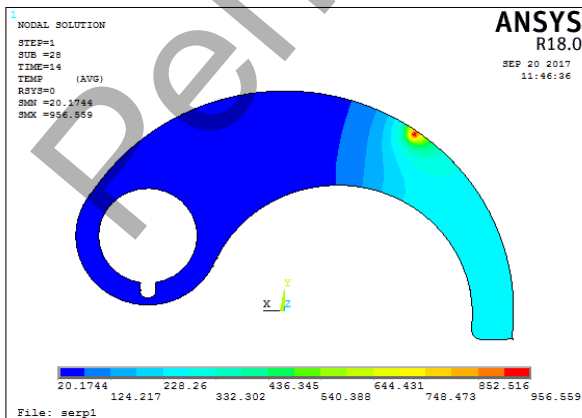
1 – $t=1$ с, 1 – $t=2$ с, 1 – $t=13$ с, 1 – $t=14$ с, 1 – $t=25$ с, 1 – $t=26$ с

Рисунок 8 – Распределение температурных полей на нижней поверхности ножа для различных моментов времени

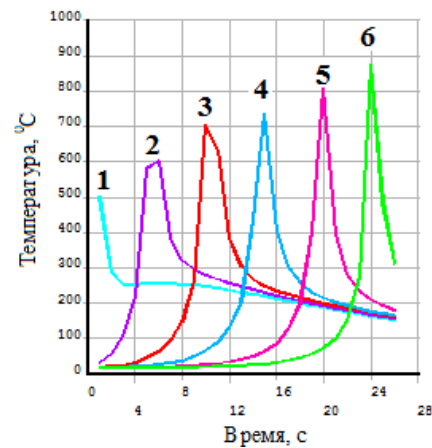
На рисунке 9 приведены типичные распределения температуры на режущей кромке в различных сечениях (рисунок 3) от времени.



в)

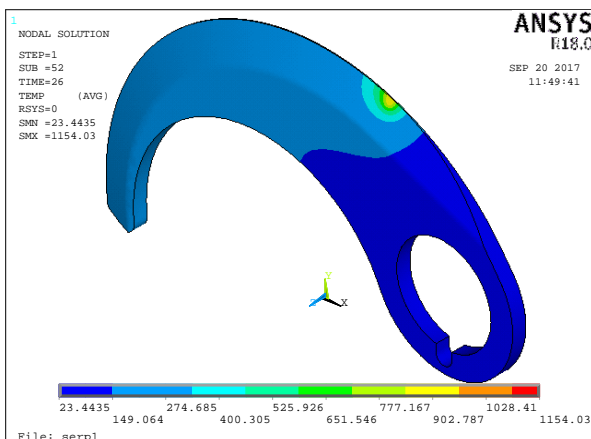


г)

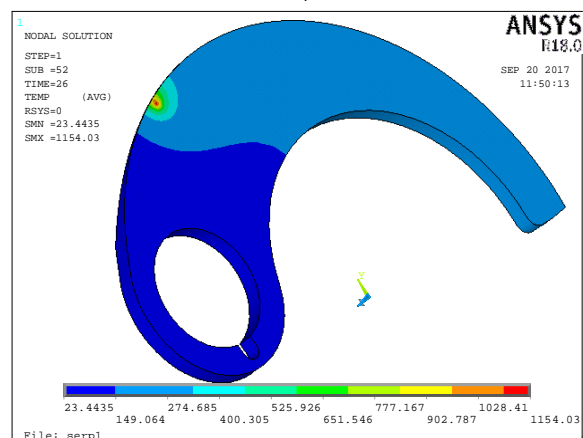


1 – сечение А, 2 – сечение В, 3 – сечение С, 4 – сечение D, 5 – сечение Е, 6 – сечение F

Рисунок 9 – Зависимость температуры на режущей кромке от времени в различных сечениях (рисунок 3)



а)



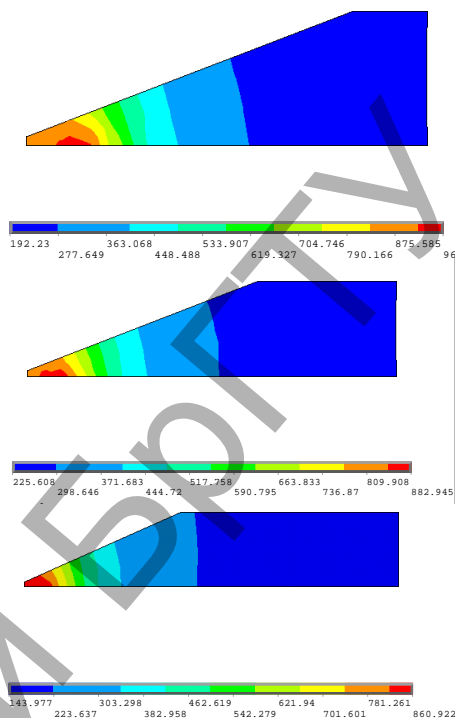
б)

а) на верхней поверхности ножа, б) на нижней поверхности ножа
Рисунок 10 – Распределение температурных полей для момента времени 26 с

Исследовано распределение температурных полей по глубине сечения измельчителя, вдоль которого перемещается источник нагрева. На рисунке 11 приведены типичные распределения температурных полей для различных сечений при скорости движения плазматрона $V=10$ мм/с.

Заключение. Процесс ППЗ измельчителей пищевого сырья из стали 14X17H2 выполнялся нанесением дорожек с шагом 1,5 мм на тело детали. Необходимая скорость движения источника и траектория плазменной струи автоматически выполнялась манипулятором. Определены оптимальные параметры процесса ППЗ: скорость движения источника $v = 10$ мм/с, расход аргона $Q_{Ar} = 1,2$ л/мин, расход азота $Q_{N2} = 3,6$ л/мин, ток дуги $I = 28$ А.

Выполненные с помощью измерительного комплекса Mistral 170705 исследования измельчителей на износостойкость показали значительное увеличение их долговечности. Срок эксплуатации измельчителей пищевого сырья увеличен в 2,3 раза.



а) в сечении А, б) в сечении В, в) в сечении D
Рисунок 11 – Распределение температурных полей в различных сечениях в момент времени, соответствующий нахождению центра источника тепла

Исследованы температурные поля при поверхностной плазменной закалке измельчителя с помощью разработанной механико-математической ANSYS-модели, учитывающей распределение температуры по диаметру пятна нагрева и зависимость характеристик материала от температуры.

СПИСОК ЦИТИРОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Кундас, С.П. Компьютерное моделирование процессов термической обработки сталей: монография / С.П. Кундас. – Минск : Бестпринт, 2005. – 313 с.
2. Басов, К.А. ANSYS: справочник пользователя / К.А. Басов. – Москва : ДМК Пресс-2005. – 640 с., ил.
3. Чигарев, А.В. ANSYS для инженеров / А.В. Чигарев, А.С. Кравчук, А.Ф. Смалюк. – Москва : Машиностроение. – 2004. – 510 с.
4. Каплун, А.Б. ANSYS в руках инженера: практическое руководство / А.Б. Каплун, Е.М. Морозов, М.А. Олферьева. – Москва : Едиториал УРСС, 2003. – 272 с.
5. Таблицы физических величин: справочник / Под ред. И.К. Кикоина. – Москва : Атомиздат, 1976. – 1008 с.

Материал поступил в редакцию 21.11.2017

VEREMEYCHIK A.I., GARBACHEVSKY V.V., SAZONOV M.I., HVISEVICH V.M. Development of technology of superficial plasma training of knives for crushing of foodstuff

In article the wear resistance of grinders of foodstuff is investigated and the technology of superficial plasma training of the cutting edge for the purpose of increase in their resource of work is developed. By results of pilot and theoretical studies of wear resistance and temperature fields the optimum modes of process of hardening are defined.