

**ТЕМПЕРАТУРНОЕ ПОЛЕ И НДС
В СЕРПОВИДНЫХ НОЖАХ-ИЗМЕЛЬЧИТЕЛЯХ
ПРИ ПОВЕРХНОСТНОЙ ПЛАЗМЕННОЙ ЗАКАЛКЕ**

А. И. ВЕРЕМЕЙЧИК, М. И. САЗОНОВ, В. М. ХВИСЕВИЧ
Брестский государственный технический университет, Беларусь

Для определения оптимальных режимов процесса упрочнения измельчителей пищевых продуктов (ножей) создан алгоритм численного решения задач по исследованию температурного поля и НДС. Разработана технология локальной поверхностной плазменной закалки (ППЗ) режущей кромки измельчителей с целью повышения их ресурса работы.

Ножи-измельчители, используемые при измельчении пищевых продуктов на универсальных куттерах «Stephan», изготовлены из хромистой жаропрочной нержавеющей стали 14X17H2 ГОСТ 5632–2014 и упрочнялись объемной закалкой. В процессе эксплуатации измельчители подвергались изнашиванию и имели короткий срок эксплуатации (рис. 1, а). Нож имеет плоскую серпообразную форму толщиной 8 мм. В результате объемной закалки твердость детали достигала величины 42–48 HRC. В установке используются два ножа, которые установлены в горизонтальном положении на вращающемся валу емкости, в которую загружаются куски сырья общей массой около 70 кг. Заточенная под углом 21° кромка детали обращена вниз. В емкость подается пар с температурой 150 °С, после размельчения и расплавления сырья часть его остается под поверхностью детали. Ведущий вал вращается с высокой скоростью, совершая 740–1480 об/мин. При стационарном режиме один цикл нагружения составляет приблизительно 7 мин, а с учетом времени перезагрузки куттера за сутки нож нагружается не более 40 раз. В реальных условиях долговечность измельчителя не превышала трех месяцев, исходя из чего разрушение материала можно считать малоцикловым, что свидетельствует о наличии механических нагрузок высокой интенсивности.

Визуальные обследования вышедших из строя ножей показали ряд типичных дефектов – затупление, растрескивание и выламывание режущей кромки, поверхностная коррозия металла, разрушение полотна детали, отламывание кусков в периферийной зоне.

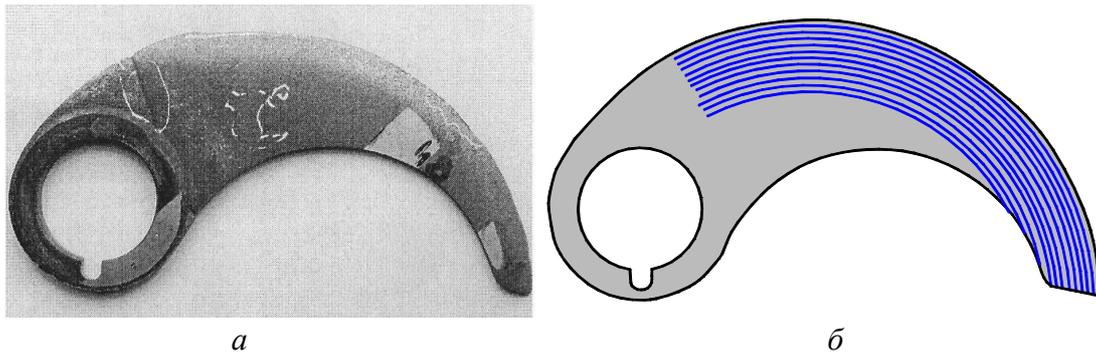


Рис. 1. Измельчители пищевых продуктов: *а* – после эксплуатации с упрочнением объемной закалкой; *б* – до эксплуатации после ППЗ

Для определения оптимальных режимов процесса ППЗ проведено исследование температурного поля и НДС, выполненное с применением вычислительного комплекса ANSYS [1]. В ходе исследований в ANSYS разработана трехмерная модель ножа-измельчителя. При решении задачи теплопроводности использовался восьмиузловой термический элемент SOLID70 (Thermal Mass Solid Brick 8node 70). В соответствии со скоростью движения плазменной струи к узлам дискретной модели ножа пошагово последовательно прикладывалась температурная нагрузка в виде конвекции. Максимальная температура на поверхности ножа должна быть на 3...5 % меньше температуры плавления стали (~1400 °C), чтобы исключить оплавление. Т.к. температура плазменной струи в ее центре составляет около 20000 °C, то на всех поверхностях модели задавалась конвекция. Известно [2], что тепловой поток плазменной струи распределяется по ширине пятна нагрева по закону, близкому к кривой вероятности Гаусса. Исходя из этого на нагреваемой поверхности коэффициент конвекции задавался различным по диаметру пятна нагрева в соответствии с нормальным распределением. Выращения для температуры T и коэффициента конвекции k задавались в следующем виде:

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

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

где $T_0 = 20\,000\text{ °C}$ – температура в центре плазменной струи; $R = 0,13\text{ м}$ – радиус кривизны траектории движения плазменной струи, определяемый

из геометрии режущей кромки ножа; v – скорость движения плазмотрона; $T_H = 20$ °С – температура окружающей среды; $k_0 = 7000$ Вт/(м²·К) – коэффициент конвекции в центре плазменной струи.

На рисунке 2 показано типичное распределение температурного поля на рабочей зоне измельчителя в различные моменты времени при $v=10$ мм/с. При исследовании деформаций и напряжений модель измельчителя закреплялась по нижней торцевой поверхности для ограничения перемещения в направлении, перпендикулярном поверхности ножа, и по поверхности шпоночного паза для ограничения перемещения в направлении, параллельном его поверхности.

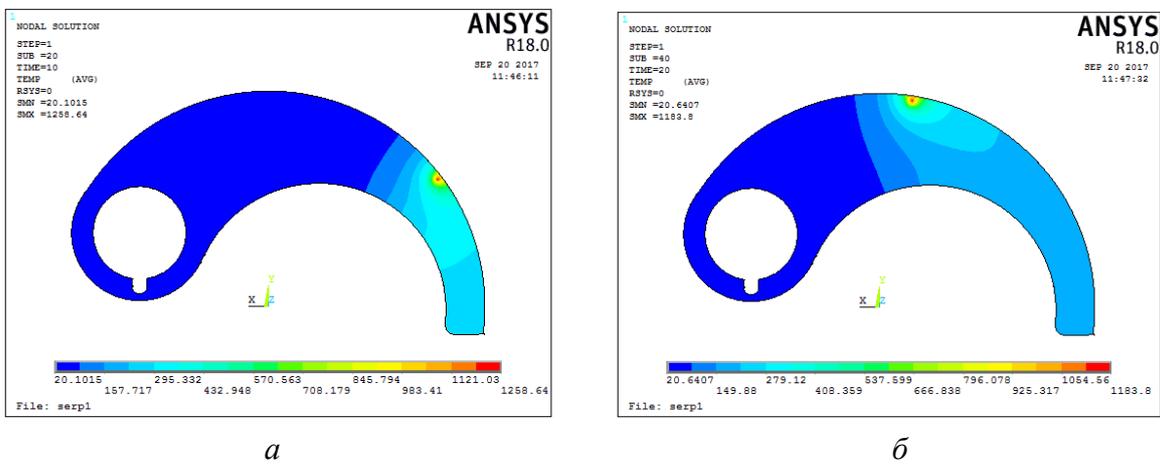


Рис. 2. Температурное поле на поверхности ножа для различных моментов времени:
a – $t = 10$ с; *б* – $t = 20$ с

На рисунке 3 представлено распределение эквивалентных напряжений по Мизесу и суммарных перемещений на рабочей зоне измельчителя в различные моменты времени при скорости движения пятна нагрева $v = 10$ мм/с.

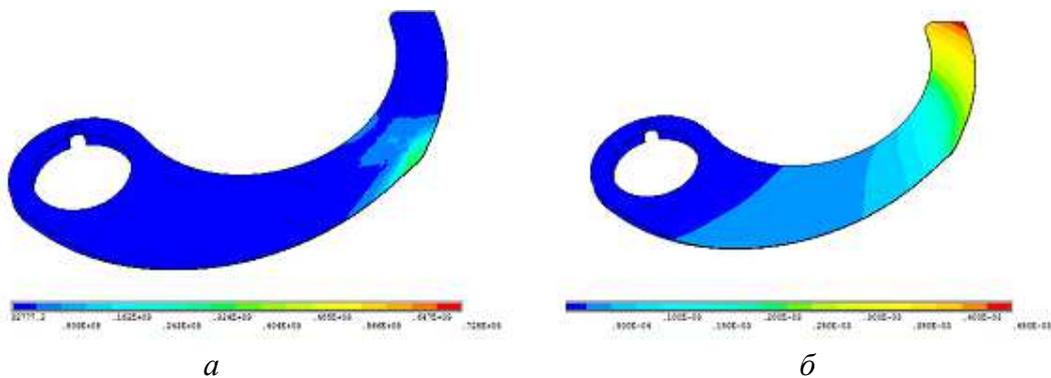


Рис. 3. Типичное поле эквивалентных напряжений (*a*) и суммарных перемещений (*б*) в момент времени 10 с

Процесс поверхностной плазменной закалки измельчителей проводился на вакуумно-плазменной установке путем нанесения дорожек с шагом 1,5–2 мм на тело детали (рис. 1, б). Необходимая скорость движения и траектория плазменной струи автоматически выполнялась манипулятором. По результатам экспериментов определены оптимальные параметры процесса ППЗ: расход аргона $Q_{Ar} = 1,2$ л/мин, расход азота $Q_{N_2} = 3,6$ л/мин, ток дуги $I = 28$ А, скорость движения источника $v = 10$ мм/с. Результаты исследований показали, что износостойкость ножей-измельчителей, упрочненных путем ППЗ, более чем в 2 раза выше, чем упрочненных объемной закалкой.

ЛИТЕРАТУРА

1. Басов, К.А. ANSYS : справочник пользователя / К.А. Басов. – М. : ДМК Пресс-2005. – 640 с.
2. Балановский, А.Е. Плазменное поверхностное упрочнение металлов / А.Е. Балановский. – Иркутск : ИрГТУ, 2006. – 180 с.