

## РАСЧЕТ ТЕМПЕРАТУРНОГО ПОЛЯ В ШЛИЦЕВОЙ ЧАСТИ ВАЛА ПРИ ЕГО ВОССТАНОВЛЕНИИ

Для оценки температурного поля при восстановлении шлицевого вала наплавкой используют различные технологические приёмы.

Целью данной работы было определение характера и уровня температурных полей и напряжений при восстановлении шлицов вала наплавкой с последующей термообработкой. Для реализации поставленной цели использовали метод математического моделирования.

В отличие от расчета температуры при сварке двух частей вала (порезка и соединение менее изношенных частей с последующей нарезкой шлицов), при расчете температуры при заварки шлицов и последующей его термообработке нет необходимости рассчитывать температуру от первой операции ремонта.

Это связано с тем, что возникшие в этом процессе температурные напряжения будут сняты при нагреве индуктором при термической обработке. Последовательно во времени рассчитывали температуру при обработке вала диаметром 20 мм при нагреве индуктором, с последующим охлаждением в воде. После этого по ранее разработанной методике [1], рассчитывали термические напряжения с учетом структурной деформации при отпуске.

Поскольку остаточные напряжения оказались меньшими, чем в зоне сварного шва, и не достигали предела текучести, расчет температуры и напряжений при отпуске не производили.

Так как температура и граничные условия симметричны в круглом сечении, производили расчет одномерного теплового поля в полярных координатах с помощью решения уравнения теплопроводности [1]:

$$c \cdot \gamma \cdot \frac{\partial T}{\partial \tau} = \lambda \cdot \left( \frac{\partial^2 T}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \cdot \frac{\partial T}{\partial r} \right) \quad (1)$$

где:  $r$  – расстояние от центра вала до любой точки по радиусу, м;

$\tau$  – время от начала расчета, ч;

$T = T(r, \tau)$  – температура в точке с координатой  $r$  в момент времени  $\tau$ , °С;

*Наведено результати досліджень розрахунку температурного поля в шлицевій частині валу наплавлянням. Визначений характер і рівень температурних полів і напруг при відновленні.*

*Побудована залежність розподілу температур, а також проведена їх оцінка в часі. Отримані результати використані для оцінки температурних напруг, що дозволяє вибрати більш ефективний спосіб відновлення.*

$\gamma$  — плотность,  $\frac{\text{кг}}{\text{м}^3}$ ;

$\lambda$  — теплопроводность,  $\frac{\text{ккал}}{\text{м} \cdot \text{час} \cdot \text{град}}$ ;

теплопроводность зависит от температуры и рассчитывали по приближенной формуле:

$$\lambda = 45 + 25 \cdot \frac{T - 1200}{1180} \quad (2);$$

$c$  — коэффициент удельной теплоемкости,  $\frac{\text{ккал}}{\text{кг} \cdot \text{град}}$ .

Начальное условие:

$$T(r, z, 0) = T_0 \quad (3),$$

где  $T_0$  — температура шлицевой части вала перед нагревом в индукторе.

Прежде, чем описывать граничные условия на поверхности (а они зависят от времени), введем следующие обозначения (время — в часах):

$\tau_1$  — время окончания нагрева под индуктором;

$\tau_2$  — время начала закалки в воде;

$\tau_3$  — время конца закалки в воде;

$\tau_4$  — полное время обработки.

Граничные условия на поверхности шлицевой части при  $r = R$  ( $R$  — радиус шлицевой части):

При  $\tau \leq \tau_1$ ,

$$Q = \frac{\partial T}{\partial r} \cdot \lambda, \quad (4),$$

где  $Q$  — задаваемый тепловой поток от индуктора.

При  $\tau_1 < \tau \leq \tau_2$  и при  $\tau_3 < \tau \leq \tau_4$  на границе с воздухом тепловой поток в виде излучения соответствует:

$$-Q = \frac{\partial T}{\partial r} \cdot \lambda \quad (5),$$

где тепловой поток  $Q$  рассчитывается по формуле

$$Q = k_{\text{в}} \cdot 3,8 \cdot \left[ \left( \frac{T + 273}{100} \right)^4 + \left( \frac{T_{\text{ср}} + 273}{100} \right)^4 \right] \quad (6),$$

$k_{\text{в}}$  — коэффициент, учитывающий конвекцию;

$3,8$  — коэффициент, зависящий от теплоемкости и степени черноты;

$T$  — температура у поверхности шлица;

$T_{\text{ср}}$  — температура окружающей среды.

При  $\tau_2 < \tau \leq \tau_3$ ,

$$-\frac{\partial T}{\partial r} \cdot \lambda = \alpha \cdot (T - T_{\text{ср}}), \quad (7),$$

где:  $T$  — температура поверхности;

$T_{\text{ср}}$  — температура окружающей среды;

$\alpha$  – коэффициент теплоотдачи от металла к воде  $\frac{\text{ккал}}{\text{м}^2 \cdot \text{час} \cdot \text{град}}$ .

Зависимости (4) и (5) относятся к условиям второго рода. Условие (7) относится к третьему роду. В данном случае условие первого рода – это когда на границе задаются значения температур.

В центре окружности при  $r=0$  задается условие симметрии, т.е. отсутствие тепловых потоков:

$$\frac{\partial T}{\partial r} = 0 \quad (8).$$

Поставленную задачу решали методом конечных разностей по явной разностной схеме [2]. Радиус  $R$  был разбит на одинаковые ячейки размером 1 мм. Каждой точке такой сеточной области устанавливается соответственно 2 индекса:

$i$  – номер линии по радиусу;

$k$  – номер расчета по времени (т.е. номер временного слоя).

Тогда уравнение теплопроводности (1) в конечных разностях будет иметь вид:

$$c_d \cdot \gamma_d \cdot \frac{T_{i,k+1} - T_{i,k}}{\Delta \tau} = \lambda_{i,k} \cdot \left( \frac{T_{i-1,k} - 2 \cdot T_{i,k} + T_{i+1,k}}{\Delta r^2} + \frac{1}{r_i} \cdot \frac{T_{i,k} - T_{i-1,k}}{2 \cdot \Delta r} \right) \quad (9).$$

Из этого уравнения температуру в точке  $i$  на следующем  $k+1$ -м шаге по времени  $T_{i,k+1}$  выражается так:

$$T_{i,k+1} = T_{i,k} + \frac{\lambda_{i,k} \cdot \Delta \tau}{c_d \cdot \gamma_d} \cdot \left( \frac{T_{i-1,k} - 2 \cdot T_{i,k} + T_{i+1,k}}{\Delta r^2} + \frac{1}{r_i} \cdot \frac{T_{i,k} - T_{i-1,k}}{2 \cdot \Delta r} \right) \quad (10).$$

Эта зависимость верна для всех внутренних точек области. В точках, прилегающих к границе, учитываются граничные условия в конечных разностях.

Центр круга

$$\frac{T_{i-1,k} - T_{i+1,k}}{2 \cdot \Delta r} = 0 \quad (11).$$

В формулу (10) при  $i=1$  вместо  $T_{0,k}$  подставляется из (11)  $T_{2,k}$ .

Граничное условие (5) с учетом (6) в разностном виде записывается так:

$$\frac{T_{m,k} - T_{m-1,k}}{\Delta r} \cdot \lambda_{m-1,k} = -k_k \cdot 3.8 \cdot \left[ \left( \frac{T_{m-1,k} + 273}{100} \right)^4 - \left( \frac{T_{cp} + 273}{100} \right)^4 \right] \quad (12).$$

Отсюда в зависимость (10) вместо  $T_{m,k}$  записывается его выражение из (12):

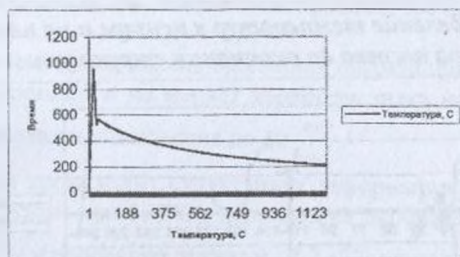
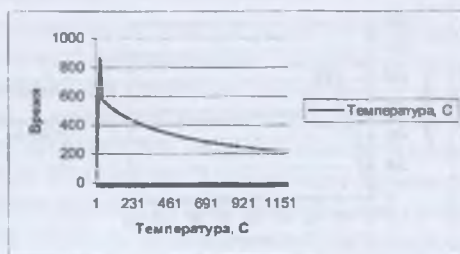
$$T_{m,k} = T_{m-1,k} \cdot \frac{\Delta r}{\lambda_{m-1,k}} \cdot k_{kv} \cdot 3.8 \cdot \left[ \left( \frac{T_{m-1,k} + 273}{100} \right)^4 - \left( \frac{T_{cp} + 273}{100} \right)^4 \right] \quad (13).$$

Аналогично, для условия (4)

$$T_{m,k} = T_{m-1,k} + \frac{\Delta r}{\lambda_{m-1,k}} \cdot Q \quad (14).$$

Для условия (7)

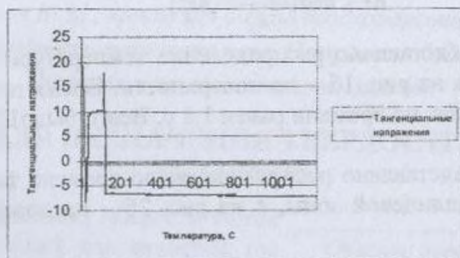
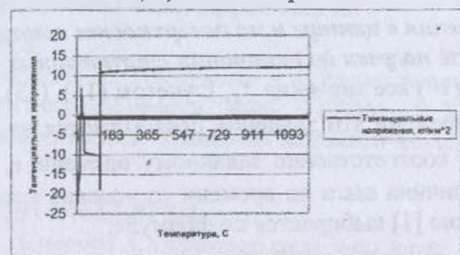
$$T_{m,k} = T_{m-1,k} - \frac{\Delta r}{\lambda_{m-1,k}} \cdot \alpha \cdot (T_{m-1,k} - T_{cp}) \quad (15).$$



а)

б)

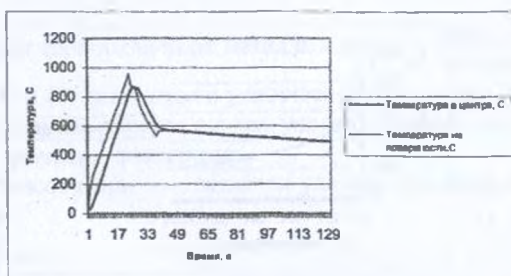
**Рис. 1** Распределение температур во времени: а) в центре иллицевой зоны; б) – на поверхности



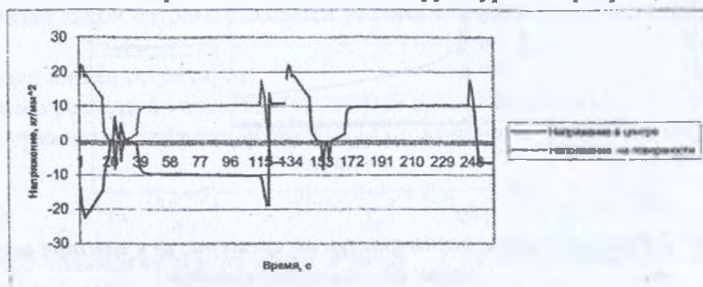
а)

б)

**Рис. 2** Распределение тангенциальных напряжений во времени: а) – в центре иллицевой зоны; б) – на поверхности



**Рис. 3** Распределение температур в центре и на поверхности за время от начала нагрева до окончания структурных превращений



**Рис. 4** Напряжения в центре и на поверхности шлицевой части за время от начала нагрева до окончания структурных превращений

Вычислив по (10) все значения  $T_{k+1}$  с учетом (11), (13), (14) и (15) для следующего шага по времени эти значения пересылаются на место  $T_k$  и расчет повторяется заново соответственно заданному времени  $\tau_k$ :  $\Delta t$  раз. Необходимо отметить, что величина шага по времени из условия устойчивости разностной схемы (10) согласно [1] выбирается по формуле:

$$\Delta t \leq \max\left(\frac{\gamma_{ш} \cdot c_{ш}}{\lambda_{ш}} \cdot \Delta r^2\right) \quad (16).$$

На рис. 1а представлено распределение температуры во времени в центре шлицевой зоны, а на рис. 1б – на поверхности. Время представлено условно в номерах шагов. Шаг по времени равен 1,8 с. Всего было 1200 шагов по времени, т.е. 2160 с.

На рис. 2а представлено распределение во времени тангенциальных напряжений в центре шлицевой зоны, а на рис. 2б – на поверхности. Напряжения приведены в  $\frac{кг^2}{мм^2}$ .

На рис. 3 представлено распределение температур в центре (темная линия) и на поверхности (светлая) за время от начала нагрева до окончания структурных превращений при закалке. На рис. 4 представлены тем же цветом напряжения в центре и на поверхности за этот период времени.

Как видно из рассмотрения этих рисунков (точные значения, взяты из файлов результатов расчета), максимальная температура на поверхности при нагреве ТВЧ равна 984,6°C, а у основания шлица она составила 862°C.

Из рис. 16 и рис. 3 можно наблюдать, как выравнивается температура по сечению шлица после закалки ТВЧ. Этот небольшой подъем температуры происходит между точками 29–43 на рис. 3 за короткий промежуток времени. Дальше изменения температур для центра и поверхности практически совпадают.

Напряжения, как видно из графика 4, в центре и на поверхности имеют разный знак. Это объясняется тем, что сечение профиля все время находится в равновесии.

Небольшая перемена знака после окончания нагрева при закалке отмечается до 43-го шага по времени и не меняет характера знака напряжений, а только уменьшая их по абсолютной величине до  $10 \frac{\text{кг}}{\text{мм}^2}$ .

В момент, когда происходит структурная деформация (переход в упругую область из пластической при 500°C), напряжения окончательно меняют знак и достигают  $+12.1 \frac{\text{кг}}{\text{мм}^2}$  у основания шлица и  $-7.2 \frac{\text{кг}}{\text{мм}^2}$  на поверхности.

Эти напряжения вдвое меньше тех, которые получают в зоне сварного шва по первой технологии [1] восстановления валов. Поэтому такая технология восстановления вала является более эффективной.

#### БИБЛІОГРАФІЯ.

1. Скобло Т.С., Науменко А.А., Гончаренко А.А. Расчет температурного поля при восстановлении вала методом сварки.: УФТ: ОТПОМ – 5; Харьков, 2004.
2. Тихонов А.Н., Самарский А.А. Уравнения математической физики. М.: Наука, 1966. – 724 с.

УДК 631.3.05:591.4:611.018.4

*Смердов А.А., доктор технічних наук,*

*Нагаєвич В. М., кандидат сільськогосподарських наук,*

*Ландар А.А., кандидат технічних наук, Петровський О.М., асистент,*

*Полтавська державна аграрна академія*

### ПРИСТРІЙ ДЛЯ ВИЗНАЧЕННЯ ТВЕРДОСТІ КІСТКОВОЇ ТКАНИНИ

**Постановка проблеми.** Міцність кісток – одна з найважливіших властивостей, що характеризує функціональний стан організму людини і тварини. Подальша інтенсифікація тваринництва визначається продуктивністю тварин, що в істотній мірі залежить від ступеня розвитку та міцності їхнього кістяка. Встановлено, що підвищений відсоток вибраковування тварин на промислових фермах і комплексах пов'язаний зі слабкістю кінцівок. Наприклад, із

*Описана нова модель пристрою для визначення твердості кісткових зразків і на його основі експериментально досліджена твердість і міцність стегнових кісток свиней різних порід.*