

РЕШЕНИЕ НЕЛИНЕЙНЫХ ЗАДАЧ НЕСТАЦИОНАРНОЙ ТЕРМОУПРУГОПЛАСТИЧНОСТИ ПРИМЕНИТЕЛЬНО К СВАРКЕ И НАПЛАВКЕ КОНСТРУКТИВНЫХ ЭЛЕМЕНТОВ*

С. Н. Киселев, А. С. Киселев, Г. Д. Кузьмина

Московский государственный университет путей сообщения, Россия

Приведены сведения о разработке методики и программного обеспечения для решения нелинейных задач нестационарной термоупругопластичности применительно к сварке и наплавке конструктивных элементов. На этой основе проведено компьютерное моделирование технологического процесса наплавки изношенных гребней цельнокатаных вагонных колес при различных параметрах технологического процесса и различной степени износа колеса.

Основными нагружающими факторами, вызывающими появление напряжений и деформаций конструктивных элементов при сварке и наплавке, являются неравномерное распределение в этом элементе температур, а также возникновение при нагреве и охлаждении структурных и фазовых превращений, связанных с изменением объема. В связи с этим для решения задачи нестационарной термоупругопластичности применительно к процессам сварки и наплавки необходимо прежде всего определить распределение температур во времени. При этом необходимо учитывать движение сварочного источника теплоты, что может быть реализовано путем разделения процесса на небольшие шаги по времени и пошагового его прослеживания.

Нелинейные задачи процессов нестационарной теплопроводности реализуются преимущественно численными методами, среди которых предпочтение следует отдать методу элементарных тепловых балансов [1] и методу конечных элементов (МКЭ) [2, 3].

Метод элементарных тепловых балансов основан на законе сохранения энергии. При этом рассматриваемый конструктивный элемент разбивается на элементарные объемы (элементы), отделенные один от другого и от окружающей среды некоторыми поверхностями. На этих поверхностях определяются тепловые потоки из элемента в элемент и из элемента в окружающую среду, а также изменение количества теплоты в элементе во времени.

Изменение теплосодержания в элементе, имеющем n_0 границ с соседними элементами и n_1, n_2, n_3 внешних границ соответственно 1-го, 2-го и 3-го рода, соответствует зависимости:

$$\Delta h_3 V_{\text{э}} = \Delta \tau \left\{ \sum_{i=1}^{n_0} \lambda_{\text{гр}i} \frac{T_{\text{см}i} - T_{\text{э}}}{d_i} \cos(n_i, d_i) S_i + \sum_{j=1}^{n_1} \lambda_{\text{гр}j} \frac{T_{\text{гр}j} - T_{\text{э}}}{d_{\text{гр}j}} \times \right. \\ \left. \times \cos(n_j, d_{\text{гр}j}) S_j + \sum_{k=1}^{n_2} g_{\text{гр}k} S_k + \sum_{l=1}^{n_3} \alpha_{\text{гр}l} (T_{\text{с}l} - T_{\text{э}}) S_l \right\},$$

где λ — коэффициент теплопроводности;
 $T_{\text{см}}$ — температура в центре смежного элемента;
 d — геометрические размеры;
 g — мощность теплового потока;
 α — коэффициент теплоотдачи с поверхности;

* Работа выполнена при содействии Российского фонда фундаментальных исследований (РФФИ).

V_3 — объем элемента;

Δt — временной шаг;

S — площадь поверхности границы элемента;

T_3 — температура в геометрическом центре элемента.

Алгоритм решения состоит в обходе всех границ элементов (внутренних и наружных), определении мощности потоков теплоты через них, последующем обходе всех элементов и коррекции температур в их центрах с учетом изменения количества теплоты в элементах.

При решении задачи нестационарной теплопроводности на основе МКЭ исследуемый объект также разбивается на элементарные объемы — конечные элементы, сопрягаемые в узлах, а численная реализация осуществляется с помощью рекуррентного соотношения [4]

$$\left(\frac{2}{3} [k] + \frac{1}{\Delta t} [c] \right) \{T\}_{i+1} = \left(\frac{1}{\Delta t} [c] - \frac{1}{3} [k] \right) \{T\}_i - \{F\},$$

где $[k]$ — матрица теплопроводности;

$[c]$ — матрица теплоемкости;

$\{T\}$ — вектор-столбец температур;

$\{F\}$ — вектор-столбец тепловых нагрузок и теплообмена со средой;

Δt — шаг по времени.

Решение теплофизической задачи на основе МКЭ является предпочтительным, т. к. последующее решение термомеханической задачи целесообразно осуществлять также на основе МКЭ.

При решении на основе МКЭ задачи нестационарной термоупругопластичности в нелинейной постановке используются основные положения теории пластического течения [5]. При этом связь между напряжениями и деформациями реализуется в виде:

$$d \varepsilon_{ij} = \frac{1}{2G} \left(d \sigma_{ij} - \delta_{ij} \frac{3\nu}{1+\nu} d \sigma_0 + \frac{3}{2} \frac{d \varepsilon_i^p}{\sigma_i} (\sigma_{ij} - \delta_{ij} \sigma_0) \right),$$

где δ_{ij} — символ Кронекера;

G — модуль сдвига;

ν — коэффициент Пуассона;

$d \varepsilon_i^p$ — интенсивность приращения пластических деформаций;

σ_i — интенсивность напряжений;

σ_0 — среднее напряжение.

Решение задачи по МКЭ сводится к решению системы линейных алгоритмических уравнений [2]:

$$[k] \cdot \{\Delta U\} = \{F\},$$

где $[k]$ — матрица жесткости системы конечных элементов;

$\{\Delta U\}$ — вектор изменения неизвестных узловых перемещений;

$\{F\}$ — вектор узловых нагрузок.

Стандартный алгоритм составления глобальной матрицы жесткости $[k]$ и вектора нагрузки $\{F\}$, а также решения системы линейных уравнений профильным методом включен в разработанный пакет программ. Он ориентирован в основном на использование изопараметрических квадратичных восьми- и двадцатиузловых конечных элементов.

Для анализа процессов сварки и наплавки с учетом нестационарности полей температур, деформаций и напряжений применяется метод пошагового решения, при котором при каждом последующем шаге нагружения решение находится с учетом результатов, полученных на предыдущем шаге. Для этого весь рассматриваемый период нагружения и разгрузки (повышения и снижения температуры) разбивается на отдельные шаги, на каждом из которых решается упругопластическая задача.

Для реализации физической нелинейности, содержащейся в уравнениях теории течения, используется итерационный процесс по методу упругих решений, предложенный А. А. Ильюшиным [6].

Прочностные, упругие и теплофизические свойства материалов исследуемых элементов конструкций принимались в зависимости от температуры. Алгоритм и программное обеспечение прошли неоднократное тестирование на основе сравнения получаемых результатов с точными решениями и экспериментальными данными, полученными авторами и приведенными в научно-технической литературе.

На основе вышеизложенной методики и программного обеспечения проводился анализ температурных полей временных и остаточных напряжений и деформаций при сварке и наплавке различных ответственных конструктивных элементов. Ниже приведены результаты анализа процессов, связанных с восстановлением наплавкой изношенных при эксплуатации гребней цельнокатаных колес грузовых вагонов. Эта проблема является весьма актуальной, т. к. на железных дорогах страны систематически изымается из эксплуатации большое количество колес, получивших значительный подрез гребня (утонение) вследствие износа (рис. 1).

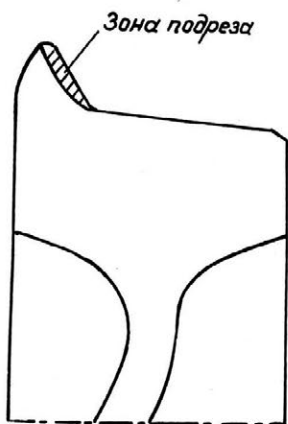


Рис. 1. Схема подреза гребня колеса

Колесо в нашем случае изготовлено из колесной стали марки 2 (ГОСТ 10791—89), близкой по химическому составу к стали 60. Наплавка производилась за шесть проходов сварочной проволокой св.08ГА под флюсом АН-348А при параметрах режима: сила сварочного тока $I_{св} = 350$ А, напряжение дуги $U = 29$ В, скорость наплавки $V_n = 18$ м/ч, диаметр электродной проволоки $d = 3$ мм, скорость подачи проволоки $V_{пп} = 76,6$ м/ч.

Моделированию подвергались следующие технологические варианты:

1. Наплавка без подогрева с наложением слоев от основания гребня к вершине при минимальной толщине обода колеса $b = 25$ мм.
2. То же, для случая наложения слоев от вершины гребня к основанию.
3. Вариант по п. 1 при толщине обода колеса $b = 60$ мм.
4. Вариант по п. 1 или 2, но при наличии начального подогрева перед наплавкой до $T = 250$ °С.

Так как скорость наплавки достаточно велика, то моделирование проводилось в осесимметричной постановке.

Рассматривалась кинетика изменения температурных полей, деформаций и напряжений от каждого из шести слоев наплавки, с учетом предистории деформирования и тепловложения от предыдущих слоев.

Анализ кинетики изменения температур показал, что в момент окончания наплавки без подогрева (50 мин при непрерывном наложении швов) значительная часть обода колеса оказывается подогретой до $T > 200$ °С, а диск колеса — до $T > 100$ °С. При наличии подогрева зона, нагретая выше 200 °С, после наплавки значительно расширяется и охватывает значительную часть диска.

Температура в гребне существенно увеличивается, и теплота медленней распространяется при наплавке от вершины гребня к его основанию.

В процессе и после наплавки формируется сложная схема временных и остаточных напряжений. Так, остаточные напряжения после наплавки без подогрева колеса с ободом толщиной 25 мм имеют следующие значения: радиальные напряжения $\sigma_r^{\text{ост}} = +370$ МПа, окружные $\sigma_{\theta}^{\text{ост}} = +520$ МПа, осевые (вдоль оси колесной пары) $\sigma_z^{\text{ост}} = +194$ МПа, $\tau_{rz} = 160$ МПа. Напряжения $\sigma_r^{\text{ост}}$ носят в диске изгибный характер и достигают максимума в зоне радиуса перехода от обода к диску.

Анализ пластических деформаций $\epsilon_{\text{пл}}^{\text{ост}}$ свидетельствует о постепенном увеличении зоны их формирования по мере наплавки слоев.

Зона остаточных пластических деформаций $\epsilon_{\text{пл}}^{\text{ост}}$ охватывает практически весь гребень колеса при максимальном значении, равном 12 %, а незначительные $\epsilon_{\text{пл}}^{\text{ост}} = 0,01$ % охватывают и всю прилегающую к гребню зону обода. На рис. 2, а, б, в представлены изолинии распределения напряжений $\sigma_r^{\text{ост}}$, $\sigma_{\theta}^{\text{ост}}$ и интенсивности остаточных пластических деформаций $\epsilon_{\text{пл}}^{\text{ост}}$ для вышеуказанного варианта.

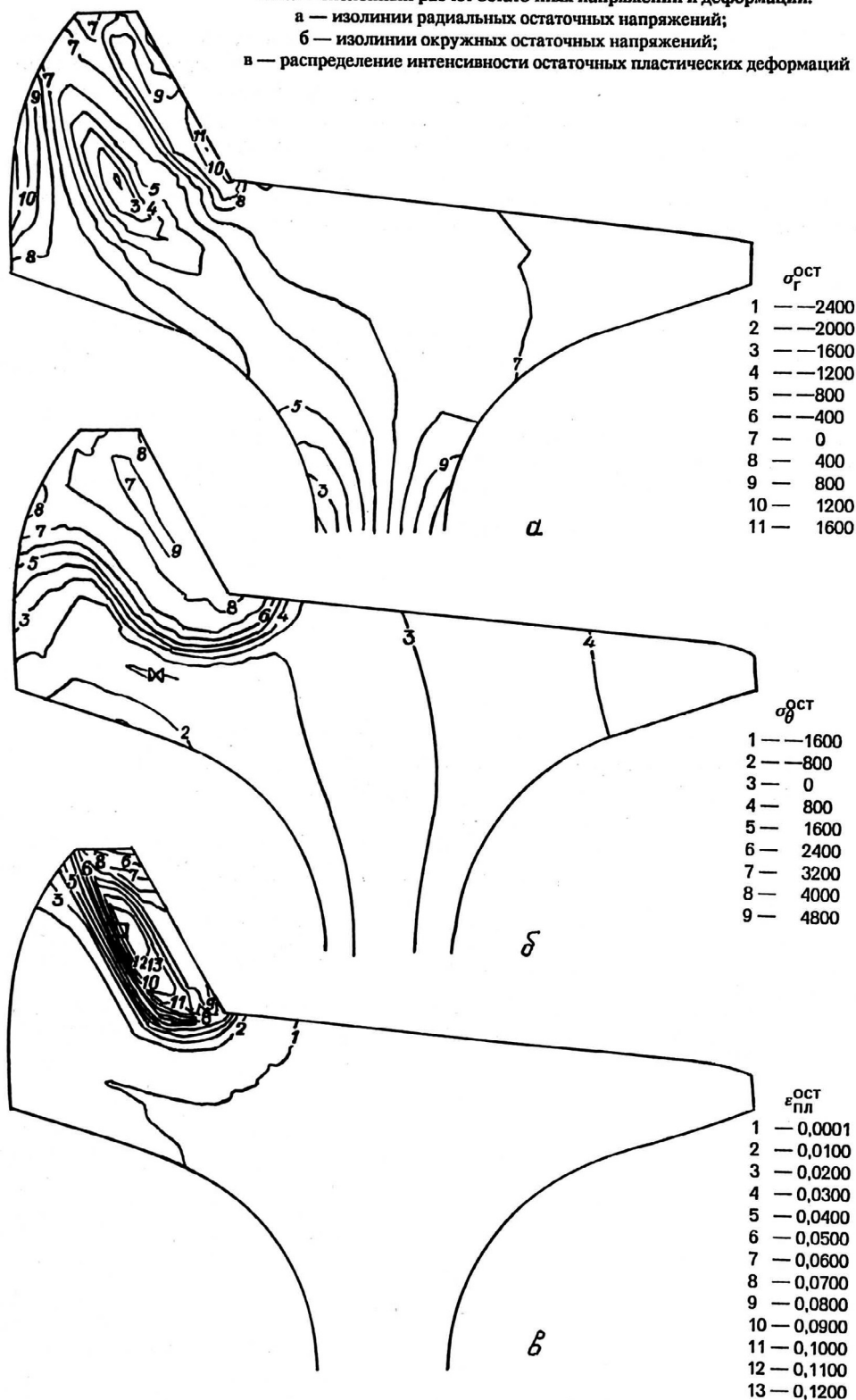
При увеличении толщины обода, наплавляемого без подогрева колеса ($b = 60$ мм), возникает еще более жесткая схема остаточных напряжений: $\sigma_r^{\text{ост}} = +400$ МПа, $\sigma_z^{\text{ост}} = 120—160$ МПа, $\sigma_{\theta}^{\text{ост}} = +510$ МПа. Однако существенно уменьшаются остаточные радиальные напряжения изгиба в зоне радиуса перехода от обода к диску.

При варианте наплавки от вершины к основанию гребня растягивающие остаточные напряжения $\sigma_r^{\text{ост}}$ несколько снижаются, однако $\sigma_z^{\text{ост}}$ и $\sigma_{\theta}^{\text{ост}}$ достигают высоких значений: $\sigma_z^{\text{ост}} = +320$ МПа, $\sigma_{\theta}^{\text{ост}} = 530$ МПа.

При оценке работоспособности наплавленного колеса существенное значение имеют также скорости охлаждения при наплавке и связанные с ними возможные структурные превращения, что также следует учитывать при определении наиболее рациональной технологии наплавки.

При наплавке колеса с толщиной обода 25 мм с предварительным подогревом последнего до $T = 250$ °С и с градиентом температур от подогрева 50 °С на расстоянии 10—13 мм от обода к ступице колеса остаточные напряжения в зоне наплавки достигают следующих значений: $\sigma_r^{\text{ост}} = +160$ МПа, $\sigma_z^{\text{ост}} = +340$ МПа, $\sigma_{\theta}^{\text{ост}} = +480$ МПа, однако значительно возрастают напряжения изгиба в зоне радиуса перехода от обода к диску колеса, где $\sigma_r^{\text{ост}} = +360$ МПа, что свидетельствует о принципиальном влиянии подогрева и закономерности распределения температур подогрева на остаточное НДС колеса. Еще более сложная и жесткая схема остаточных напряжений возникает при наплавке с подогревом колеса с толщиной обода 60 мм, при этом увеличиваются пластические деформации в зоне радиуса перехода от обода к диску, где при эксплуатации возникают разрушения.

Рис. 2 Численный расчет остаточных напряжений и деформаций:
 а — изолинии радиальных остаточных напряжений;
 б — изолинии окружных остаточных напряжений;
 в — распределение интенсивности остаточных пластических деформаций



Выводы

1. Разработано методическое и программное обеспечение, позволяющее проводить компьютерное моделирование сложных технологических процессов, связанных с решением нелинейных задач нестационарной термоупругопластичности.

2. На базе разработанной методики проведено компьютерное моделирование процессов термоупругопластического деформирования при многослойной наплавке гребней железнодорожных колес, претерпевших износ в эксплуатации. Рассмотрены различные технологические варианты, позволившие сформулировать ряд конкретных рекомендаций по выбору наиболее рациональных вариантов.

Литература

1. Коздоба Л. А. Методы решения нелинейных задач теплопроводности. — М.: Наука, 1975. — 227 с.
2. Зенкевич О. Метод конечных элементов в технике. — М.: Мир, 1975. — 440 с.
3. Куркин А. С. Применение теории течения и метода конечных элементов. — М.: Изв. вузов. Машиностроение. 1988. № 1. С. 16—20.
4. Топоров В. В., Киселев С. Н. Расчет температурных полей при сварке пластин в нелинейной постановке с учетом распределенности источника теплоты // Сб. Вопросы атомной науки и техники. Сер. Сварка в ядерной технологии. 1984. Вып. 1 (12). С. 15—18.
5. Малинин Н. Н. Прикладная теория пластичности и ползучести. — М.: Машиностроение, 1968. — 400 с.
6. Ильюшин А. А. Пластичность. — М. Изд-во АН СССР, 1963. — 376 с.

SOLVING NONLINEARITY PROBLEMS OF NONSTATIONARY THERMOPLASTOELASTIC DEFORMATION AS APPLIED WELDING AND FACING MECHANICAL ELEMENTS

S. N. Kiselyov, A. S. Kiselyov, G. D. Kuzmina

Moscow state University of Railway Communications, Russia

In this article we present information about the development of methods and software system for solving nonlinearity problems of nonstationary thermoplastoelastic deformation as applied to welding and facing mechanical elements.

On this basis there was carried out computer simulation of the process of facing worn-out ridges of solid-rolled wagon wheels under various parameters of the process and to different degrees of wear and tear of the wheel.