

Приведенные на рис. 1-5 картины отвечают соответственно случаям: 1) перепад усилия смыкания 250-330 кН при внутреннем давлении в полости 2,5 МПа, винты касаются полуматрицы, опоры отсутствуют; 2) перепад усилия смыкания 250-330 кН при внутреннем давлении в полости 2,5 МПа, винты отсутствуют, опоры отсутствуют; 3,4) перепад усилия смыкания 250-330 кН при внутреннем давлении в полости 2,5 МПа, винты не касаются полуматрицы, опоры отсутствуют; 5) перепад усилия смыкания 1000-875 кН при внутреннем давлении в полости 9,8 МПа, винты затянуты, установлены 2 опоры с натягом 0,29 мм.

Дальнейшими шагами расчетно-экспериментального исследования являются: расшифровка спекл-интерферограмм, сравнение с численными результатами, корректировка модели, повторное сравнение, и т.д. с различным набором параметров. Окончательным результатом процедуры является достоверная численная модель с набором значимых параметров. Приведенная схема в каждом конкретном случае нуждается в конкретизации функционала соответствия результатов численных и экспериментальных результатов, что представляется отдельной сложной задачей.

Литература

1. Ткачук Н.А. Интенсивная схема экспериментальных исследований элементов технологических систем, Динамика и прочность машин, 1998, вып. 56, с. 175-181. 2. Капустин А.А. Количественная оценка голографических интерферограмм с помощью спекл-интерферометрии в прочностных исследованиях. – В кн.: Оптико-когерентные информационно-измерительные системы. – Харьков: ХАИ, 1977, с. 149-154.

Поступила в редколлегию 16.09.2001

УДК 625.2.012.3

ОПТИМИЗАЦИЯ ТЕХНОЛОГИЧЕСКОГО НАГРЕВА ВАГОННОГО КОЛЕСА ПРИ СБОРКЕ КОЛЕСНОЙ ПАРЫ

А.В.Щепкин

Национальный технический университет "ХПИ", Харьков, Украина

On the basis of the available experimental data the systematic numerical research of one piece rolled railroad car wheel were made using technological heating by induction-heating devices which allowed the establishment of the laws of the stress-strain state of the wheel set elements, during its thermal assembly.

Тепловой метод формирования колесных пар рельсового транспорта обладает рядом преимуществ по сравнению с прессовым [1]: обеспечивает большую

прочность соединений; исключает повреждение сопрягаемых поверхностей в процессе сборки; повышает усталостную прочность осей в процессе эксплуатации; снижает количество брака при формировании колесных пар; обеспечивает возможность автоматизации процесса сборки; допускает возможность разборки без повреждения сопрягаемых поверхностей. Индукционно-нагревательные устройства (ИНУ) для формирования и расформирования колесных пар, работающие на токах промышленной частоты, нагревают колеса за короткое время, просты в изготовлении и надежны в эксплуатации.

В связи с использованием теплового метода сборки колесных пар существенным оказывается вопрос о температурных напряжениях, поскольку колесо (рис. 1) подвергается значительным тепловым воздействиям.

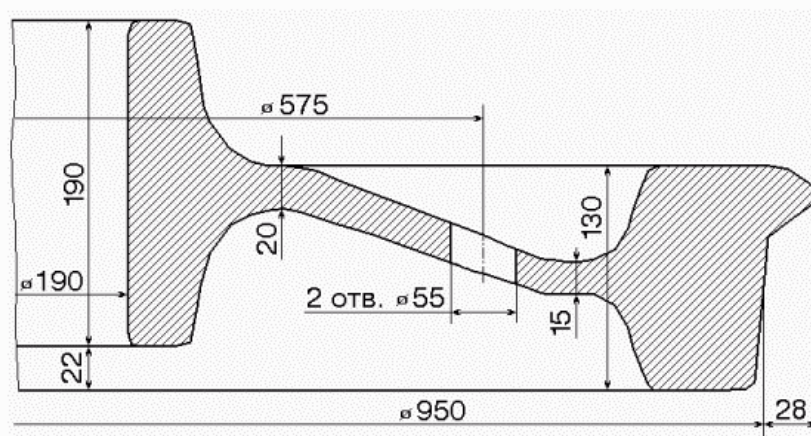


Рис. 1. Вагонное колесо.

Для расчета напряженно-деформированного состояния колеса был применен МКЭ [2], исследуемая деталь аппроксимируется тороидальными КЭ треугольного поперечного сечения с тремя узлами. Минимальный размер элемента в зонах с большими градиентами напряжений составил 0,01 м по радиусу, число КЭ по толщине в дисковой части колеса равно 12 (рис. 2). При учете пластичности была использована теория малых упругопластических деформаций, с использованием метода дополнительных нагрузок [3]. Материал предполагается упругим с линейным упрочнением вплоть до предела прочности.

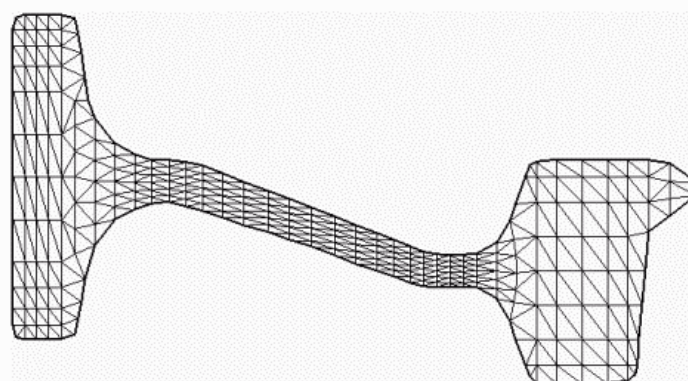


Рис. 2. Схема разбиения детали на конечные элементы.

Для исследования напряженно-деформированного состояния вагонного колеса при технологическом нагреве было использовано распределение температур, полученное экспериментально [4]. Время нагрева ступицы колеса под посадку на ось составляет 2 мин. На рис. 3 приведено распределение температур в колесе в 2 мин. (момент окончания нагрева) и в 2,5 мин. с момента начала нагрева, построенное на основе экспериментальных данных. В 2 мин. расширение ступицы $u \geq 117 \cdot 10^{-6}$ м, уровень напряжений (расчет упругого деформирования) $\sigma_e \leq 500$ МПа; в 2,5 мин. $u \geq 174 \cdot 10^{-6}$ м.

Характеристики материала детали: предел текучести $\sigma_T = 350$ МПа; модуль упругости $E = 0,21 \cdot 10^6$ МПа; коэффициент Пуассона $\nu = 0,33$; предел прочности $\sigma_B = 600$ МПа; коэффициент линейного расширения $\alpha = 11,9 \cdot 10^{-6} \text{ град}^{-1}$; плотность $\rho = 7800 \text{ кг/м}^3$; удельная теплоемкость $c = 460 \text{ Дж/кг} \cdot \text{град.}$; коэффициент теплопроводности $K = 80 \text{ Вт/м} \cdot \text{град.}$

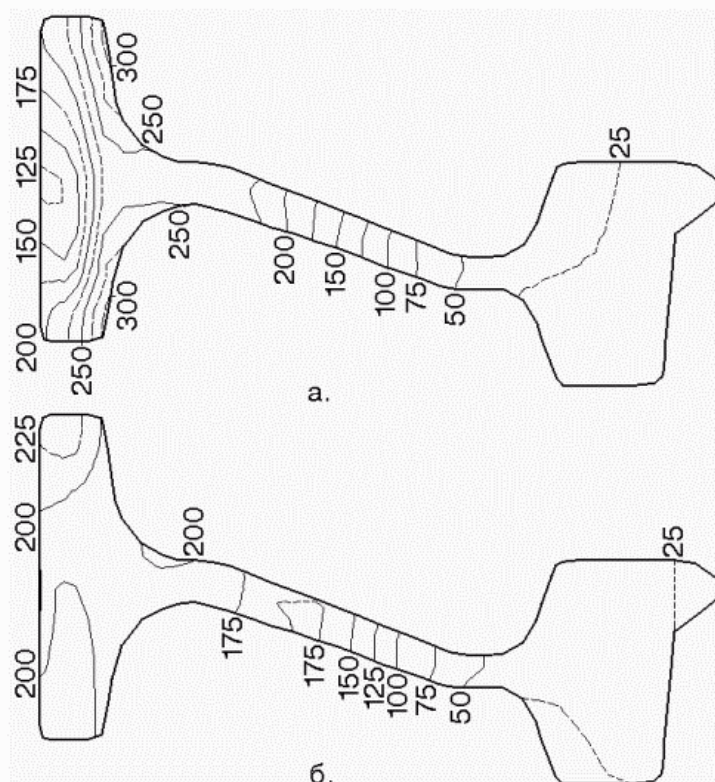


Рис. 3. Распределения температуры в колесе при его нагреве в 2 мин. (а) и 2,5 мин. (б).

На рис. 4 показано распределение эквивалентных напряжений σ_e в поперечном сечении колеса в 2 и в 2,5 мин. с момента начала нагрева, рассчитанное на основе экспериментально полученных температур.

Вагонное колесо имеет ярко выраженную ступицу, что дает возможность, в случае применения для сборки нагрева, снизить энергозатраты. В зависимости от типа нагревателя температурное поле вдоль радиуса

нагреваемой детали может изменяться в широких пределах. Поэтому целесообразно определить такое распределение температуры, которое, обеспечивая технологически заданное расширение отверстия ступицы $u_{CT} \leq 0,2 \cdot 10^{-3}$ м, минимизирует количество тепла W , сообщенное детали при ограничении уровня напряжений σ_e и температурного диапазона: $20^{\circ} \leq T \leq 320^{\circ}$. Для решения поставленной задачи использовался метод прямого поиска, не требующий вычисления производных исследуемой функции - метод комплексов [5]. При поиске оптимальных температурных полей производится расчет упругого деформирования.

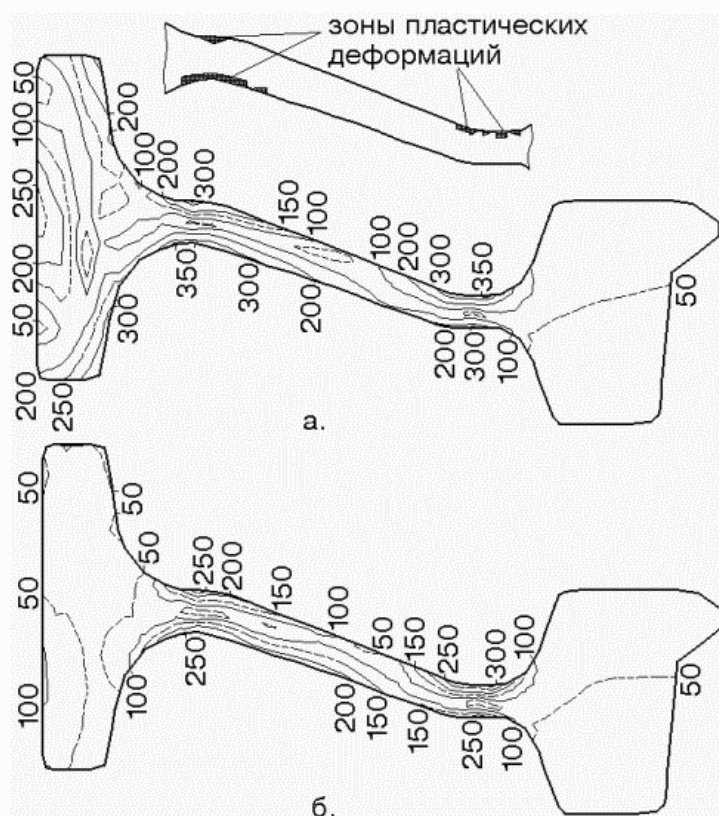


Рис. 4. Распределения напряжений σ_e в колесе при его нагреве в 2 мин. (а) и 2,5 мин. (б).

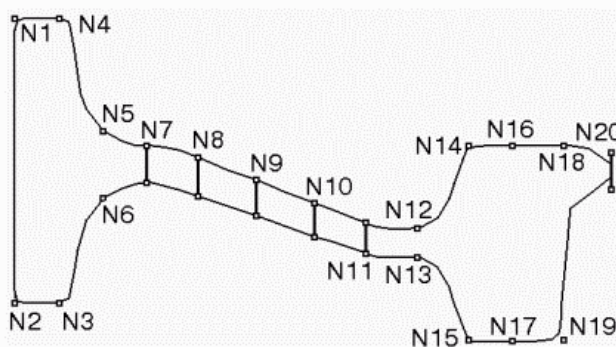


Рис. 5. Схема расположения точек задания температуры в колесе при оптимизации температурного поля

Проводился поиск оптимальных режимов нагрева при задании функции $T(r,z)$ в 20 точках поперечного сечения колеса и изменении ее в промежуточных точках по линейному закону (рис. 5). На рис. 6 представлены оптимальные температурные поля в колесе при нагреве под посадку на ось в зависимости от принятого ограничения по напряжениям. На рис. 7 показаны эквивалентные напряжения σ_e в поперечном сечении колеса, пересчитанные с учетом пластического деформирования после нахождения оптимального температурного поля.

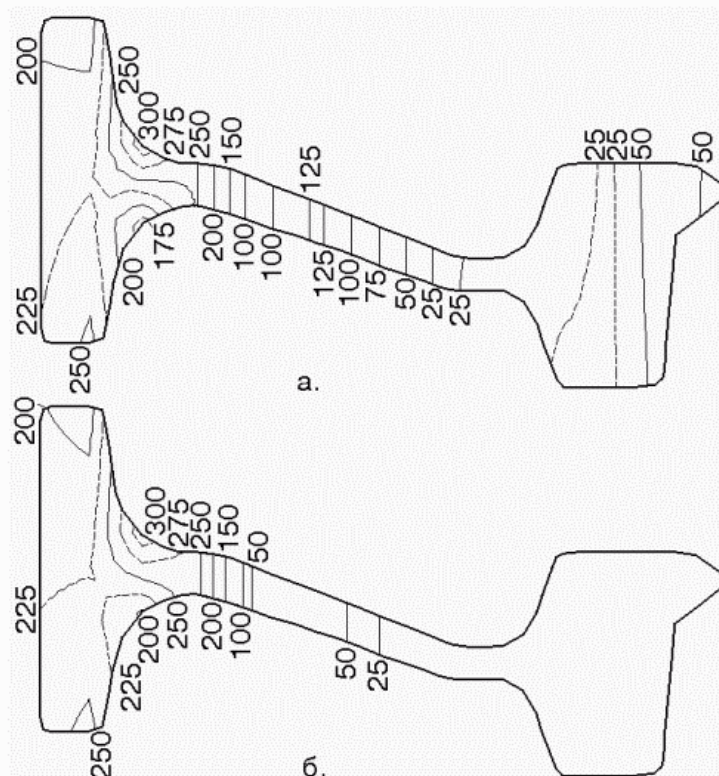


Рис. 6. Оптимальные температурные поля в зависимости от принятого ограничения по напряжениям: $\sigma_e \leq 350$ МПа (а) и $\sigma_e \leq 450$ МПа (б), град.

Таблица 1. Расход энергии на технологический нагрев детали, W [кДж]

Режим нагрева	W [кДж]
Равномерный нагрев	29541
Экспериментальные данные, t = 2 мин.	9143
Оптимальное температурное поле, $\sigma_e \leq 350$ МПа	9668
$\sigma_e \leq 450$ МПа	7128
Оптимизация мощности теплового потока:	
$t_{\text{НАГР}} = 2$ мин.; $\sigma_e \leq 350$ МПа	9055
$t_{\text{НАГР}} = 2$ мин.; $\sigma_e \leq 450$ МПа	6746
$t_{\text{НАГР}} = 3$ мин.; $\sigma_e \leq 350$ МПа	9774
$t_{\text{НАГР}} = 3$ мин.; $\sigma_e \leq 450$ МПа	6936

Использование теплового метода нагрева деталей с помощью ИНУ вносит определенные ограничения на форму температурного поля: тепло подается в поверхностный слой боковых поверхностей деталей. На рис. 9 представлены оптимальные схемы распределения мощности тепловых потоков на боковых поверхностях колеса, которые обеспечивают оптимизацию расхода энергии W при выполнении ограничений по расширению отверстия ступицы, температурам и напряжениям. Время нагрева детали $t_{\text{НАГР}}$ принято 2-3 мин.; ограничения по напряжениям: $\sigma_e \leq 350$ МПа или $\sigma_e \leq 450$ МПа, число параметров оптимизации 27. При поиске оптимальных температурных полей предполагается упругое деформирование.

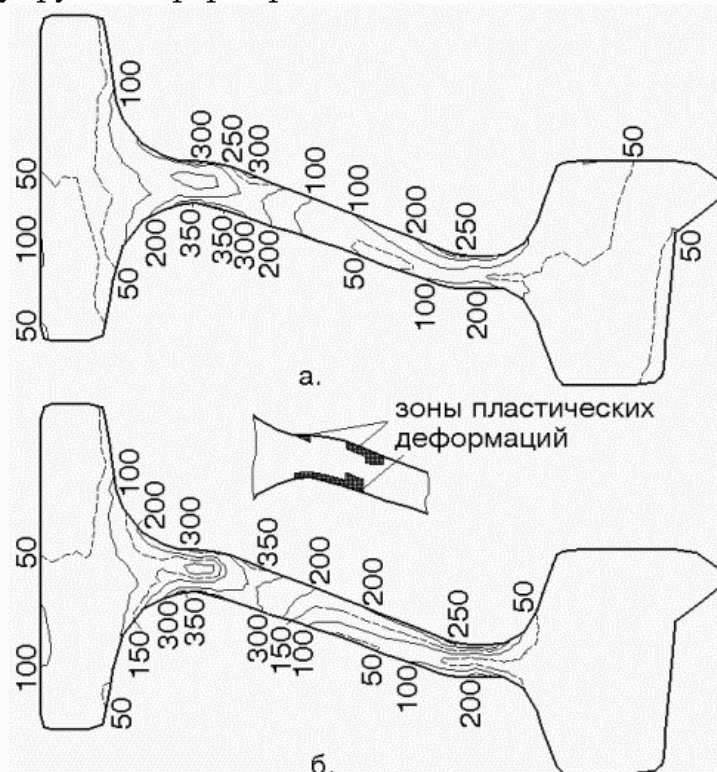


Рис. 7. Эквивалентные напряжения σ_e , обусловленные оптимальным температурным полем в колесе при ограничениях при оптимизации $\sigma_e \leq 350$ МПа (а) и $\sigma_e \leq 450$ МПа (б), МПа

На рис. 8 представлены температурные поля в колесе в зависимости от принятых ограничений. Распределение эквивалентных напряжений σ_e в колесе близко к показанным на рис. 6. В табл. 1 приведены данные о расходе энергии на технологический нагрев детали для рассмотренных режимов нагрева.

Была выполнена оптимизация температурного поля в колесе при его нагреве для посадки на ось. Наибольший расход энергии необходим при равномерном нагреве всей детали. Существующий режим нагрева не обеспечивает выполнение ограничений по расширению отверстия ступицы и по напряжениям. Оптимальный нагрев при $\sigma_e \leq 350$ МПа обеспечивает

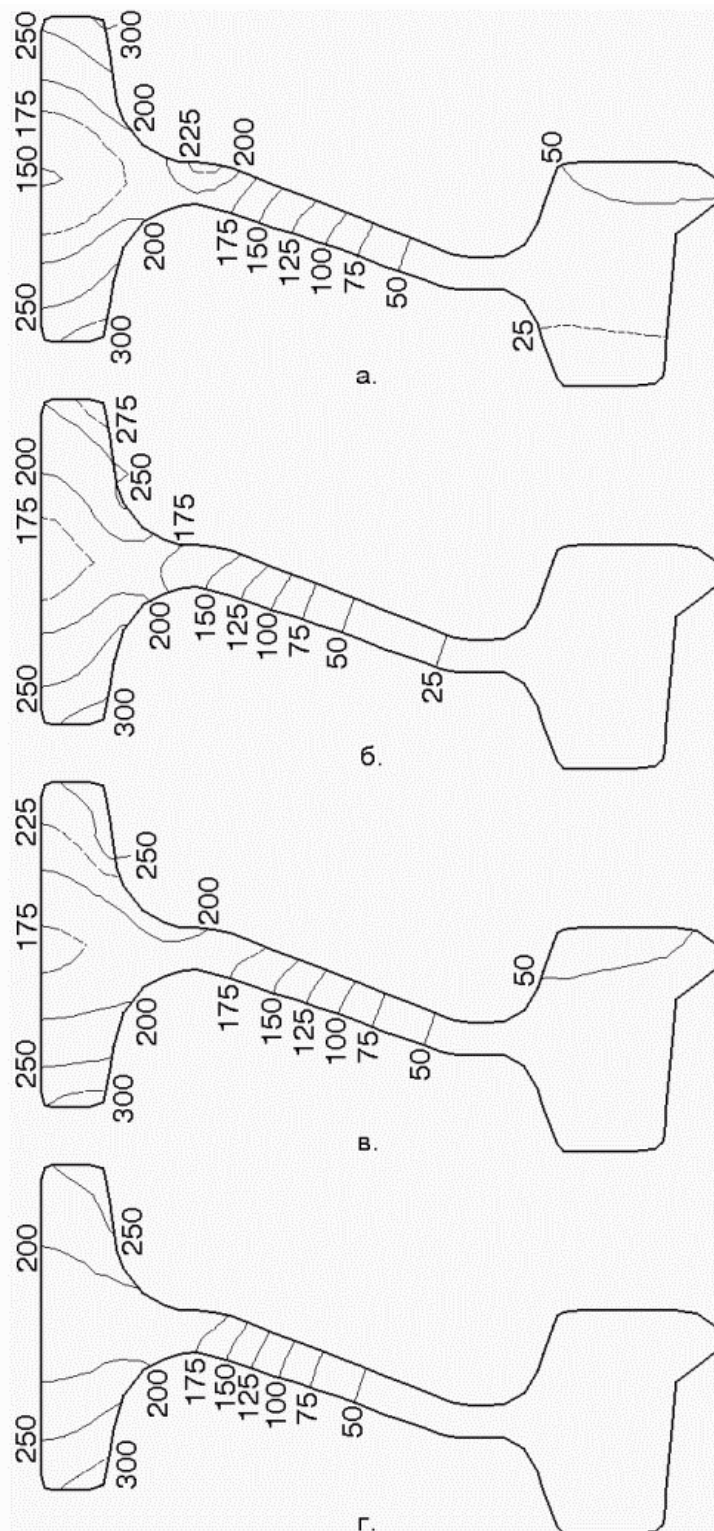


Рис. 8. Оптимальные температурные поля полученные варьированием мощности тепловых потоков в зависимости от ограничений по времени нагрева (а, б - 2 мин.; в, г - 3 мин.) и напряжениям (а, в - $\sigma_e \leq 350$ МПа; б, г - $\sigma_e \leq 450$ МПа).

примерно такой же расход энергии, как и существующий режим нагрева, при выполнении всех ограничений и отсутствии пластических деформаций.

Нагрев при $\sigma_e \leq 450$ Мпа дает экономию в 14-16 % и прочность соединения с осью аналогичную существующему режиму нагрева. Во всех оптимальных режимах необходим асимметричный нагрев ступицы колеса.

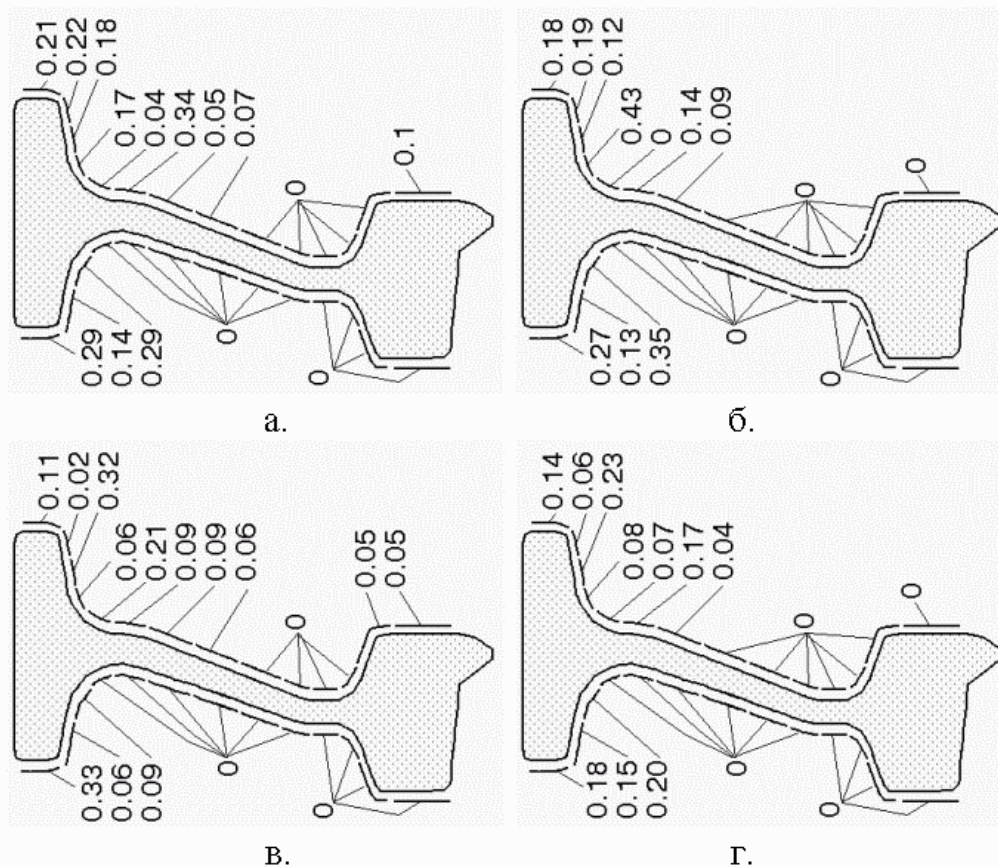


Рис. 9. Распределение мощности тепловых потоков q [МВт/м²] на боковых поверхностях колеса в зависимости от принятых ограничений по времени нагрева (а, б - 2 мин.; в, г - 3 мин.) и напряжениям(а, в - $\sigma_e \leq 350$ Мпа; б, г - $\sigma_e \leq 450$ Мпа).

Литература

1. Андреев Г.Я. Тепловая сборка колесных пар. - Харьков, Издательство Харьковского университета, 1965. - 227 с.
2. Образцов И.Ф., Савельев Л.М., Хазанов Х.С. Метод конечных элементов в задачах строительной механики летательных аппаратов. - М., Высшая школа, 1985. - 392 с.
3. Andreev A.G., Scepkin A.W., Laugwitz F. Untersuchung von Spannungen und Deformationen in Eisenbahnradern infolge induktiver Erwärmung bei der Montage. - Technische Mechanik, Вп. 15, Н. 4 1995, S. 271-280.
4. Приложение методов теории пластичности и ползучести к решению инженерных задач машиностроения: В. 2 ч. Ч. 2. Можаровский Н.С. Качаловская Н.Е. Методы и алгоритмы решения краевых задач. - Киев, Вища школа, 1991. - 287 с.
5. Реклейтис Г., Рейвиндран А., Рэгсдел К. Оптимизация в технике: в 2-кн. Кн. 2. - М.: Мир, 1986. - 320 с.

Поступила в редколлегию 08.09.2001