

МАТЕМАТИЧЕСКОЕ И КОМПЬЮТЕРНОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ТЕПЛОВЫХ ПРОЦЕССОВ И ОСТАТОЧНЫХ НАПРЯЖЕНИЙ ПРИ ВЗАИМОДЕЙСТВИИ КАТОДНОГО ПЯТНА ВАКУУМНОЙ ДУГИ С ПОВЕРХНОСТЬЮ МЕТАЛЛОВ

Кузнецов В.Г.

Институт проблем машиноведения Российской академии наук, Санкт-Петербург

Ключевые слова: катодное пятно, вакуумная дуга, моделирование, температура, остаточные напряжения, поверхность, плазма.

Аннотация. Решена задача о распределении температуры под катодным пятном с учетом плавления и испарения металла, доведенного до температуры кипения на поверхности катодного пятна. Процесс переноса тепла в металле описывается трехмерным нестационарным уравнением теплопроводности в декартовой системе координат. Для решения поставленной задачи использовался численный метод конечных разностей и переменных направлений. Представлены расчетные значения времени нахождения катодного пятна на одном месте от его радиуса и скорости движения. Выполнена оценка влияния высокой температуры в катодном пятне и скорости его перемещения на напряжения и деформации, возникающие в металлическом кольце при обработке его внешней поверхности катодными пятнами вакуумной дуги. Задача решалась методом конечных элементов.

MATHEMATICAL AND COMPUTER MODELING OF THERMAL PROCESSES AND RESIDUAL STRESSES IN THE INTERACTION OF THE CATHODE SPOT OF THE VACUUM ARC WITH THE SURFACE OF METALS

Kuznetsov V.G.

Institute of Problems of Mechanical Engineering of the Russian Academy of Science, Saint-Petersburg

Keywords: cathode spot, vacuum arc, simulation, temperature, residual stresses, surface, plasma.

Abstract. The problem of temperature distribution under the cathode spot is solved, taking into account the melting and evaporation of metal driven to the boiling point on the surface of the cathode spot. The process of heat transfer in a metal is described by a three-dimensional unsteady heat conduction equation in a Cartesian coordinate system. To solve the problem, the numerical method of finite differences and variable directions was used. The calculated values of the time spent by the cathode spot in one place from its radius and speed of movement are presented. The influence of the high temperature in the cathode spot and the speed of its movement on the stresses and deformations that occur in the metal ring when its outer surface is treated with cathode spots of the vacuum arc are evaluated. The problem was solved by the finite element method.

Введение

Фундаментальные и прикладные исследования в области механики и физики взаимодействия плазменных струй из катодных пятен (КП) вакуумной дуги с поверхностью твердого тела в последние годы значительно активизировались в связи с развитием новых областей применения вакуумно-дугового разряда, связанных с модифицированием поверхностей металлов катодными пятнами [1-3]. Учитывая, что температура в катодном пятне находится на уровне температуры кипения материала, особое значение должно уделяться тепловым процессам на поверхности и в объеме обрабатываемых изделий.

Известно, что движение катодных пятен носит прерывистый характер: некоторое время пятно остается на одном месте, а затем перепрыгивает на новый участок поверхности, отстоящий от первоначального на один – два радиуса пятна. Исследование эрозионных следов перемещающихся пятен показало, что плотность тока в таких пятнах имеет порядок 10^7 - 10^8 А/см². Для обеспечения таких высоких плотностей тока электрическое поле на поверхности катода должно быть на уровне $E \sim 10^8$ В/см. В катодном пятне вакуумной дуги

это поле создается ионами, образовавшимися из испарившихся атомов, поэтому температура катода в пятне должна быть достаточно высока. Так, при плотности тока $j \approx 10^8 \text{ A/cm}^2$ плотность ионного тока должна быть на уровне $j_i \approx 10^7 \text{ A/cm}^2$. Полагая температуру прикатодной плазмы порядка 1 эВ, из условия $j_i = en_i v_i$ получаем концентрацию ионов около катода порядка $3 \cdot 10^{20} \text{ см}^{-3}$, что соответствует давлению $p \approx 300 \text{ атм}$. Для того чтобы создать такое давление, катод должен быть нагрет до температуры $T \approx 5000 \text{ К}$.

Методика расчета

В [4-6] предложена методика, позволяющая рассчитать толщину пленки Δ расплавленного металла на поверхности катодного пятна, которая увеличивается за счет проплавления все новых слоев катода под пятном и уменьшается за счет выдавливания расплавленного металла. Заметим, что за время жизни пятна металл прогревается на глубину, много меньше радиуса, и задача близка к плоской. Тогда:

$$\frac{d\Delta}{dt} = \frac{\chi}{\rho(c_p T_k + \lambda_{пл})} \cdot \frac{T_k - T_{пл}}{\Delta} - \frac{dh}{dt} \approx \frac{a}{\Delta} - \frac{dh}{dt}, \quad (1)$$

где ρ – плотность материала; c_p – теплоемкость; $\lambda_{пл}$ – теплота плавления; $T_{пл}$ – температура плавления катода; χ и a – его тепло- и температуропроводность; h – глубина лунки.

При выводе (1) считалось, что на поверхности КП поддерживается температура T_k , много большая $T_{пл}$. Из уравнения (1) можно получить следующее выражение для скорости углубления кратера катодного пятна [5]:

$$h(t) = \sqrt{\frac{Ra}{2V}} \left\{ \frac{1}{2} \ln \frac{1 + \sqrt{1 - \exp(-4Vt/R)}}{1 - \sqrt{1 - \exp(-4Vt/R)}} - \sqrt{1 - \exp(-4Vt/R)} \right\}, \quad (2)$$

где V – скорость, с которой жидкость покидает лунку; R – радиус катодного пятна.

Теперь мы имеем возможность оценить время жизни пятна. Используя результаты предыдущих оценок ($j = 1,6 \cdot 10^7 \text{ A/cm}^2$) и полагая полное напряжение на дуге 25 В, получаем время жизни катодного пятна $\tau = 4 \cdot 10^{-8} \text{ с}$ и глубину лунки катодного пятна $h = 2,5 \cdot 10^{-4} \text{ см}$. Полученное время жизни согласуется с частотным спектром флуктуации напряжения дуги – белый шум наблюдается в полосе частот $\sim 15 \text{ МГц}$.

С учетом полученных выше параметров катодного пятна вакуумной дуги решалась задача о распределении температуры под катодным пятном с учетом плавления и испарения металла, доведенного до температуры кипения на поверхности катодного пятна.

Процесс переноса тепла в металле описывается трехмерным нестационарным уравнением теплопроводности в декартовой системе координат в виде:

$$\rho c_p \frac{\partial T}{\partial t} = \lambda \left(\frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} \right), \quad (3)$$

где λ – коэффициент теплопроводности; T – температура; x, y, z – координаты.

Воздействие катодного пятна было учтено в виде теплового потока в поверхность металла. Тепловой поток пропорционален напряжению U на вакуумной дуге, силе тока I и коэффициенту катодной мощности h_k , тогда:

$$\lambda \frac{\partial T_k}{\partial s} \Big|_s = \sigma \varepsilon (T_\infty^4 - T^4) + \frac{UIh_k}{S}, \quad (4)$$

где T_∞ – температура окружающей среды; σ – постоянная Стефана-Больцмана; ε – интегральный коэффициент излучения, S – площадь катодного пятна.

При решении задачи были учтены плавление и испарение металла под действием катодного пятна. Для примера учета этих явлений рассмотрим фазовый переход из твердого в жидкое состояние. Переход из жидкой фазы в газообразную осуществляется аналогично. Переход в жидкую фазу осуществляется при достижении температуры металла температуры плавления $T_{пл}$. При этом для перехода необходимо затратить определенное количество тепловой энергии $Q_{пл}$. Зная значение удельной теплоты плавления $\lambda_{пл} = Q_{пл} / m$, где m – масса

плавящегося вещества, можно использовать следующий подход. При достижении температуры плавления примем значение теплоемкости $c_p = c_{temp}$ плавящегося материала значительно больше холодного. Если нагреть плавящийся материал на $\Delta T = c_{temp} / \lambda_{пл}$, можно подобрать такое c_{temp} , чтобы ΔT составляло 1-2°C. Таким образом, мы инициируем расход необходимого количества теплоты при пренебрежимо малом изменении температуры. При переходе из одной фазы в другую менялись свойства материала.

Решение уравнений производилось численно. Расчетная область разбивалась равномерной трехмерной разностной сеткой в направлениях x , y и z . Для решения поставленной задачи использовался численный метод конечных разностей и переменных направлений.

Для численных расчетов были выбраны [7] следующие значения параметров:

$$\rho = 7800 \frac{\text{кг}}{\text{м}^3}; \lambda = 52 \frac{\text{Вт}}{\text{м} \cdot \text{°C}}; c_p = 462 \frac{\text{Дж}}{\text{кг} \cdot \text{°C}}; U = 20\text{В}; h_k = 0,3; \varepsilon = 0,9.$$

Результаты расчеты

В численных экспериментах было исследовано распределение температуры под катодным пятном в момент, когда катодное пятно передвигается в другое место. Этому моменту соответствует максимальная температура под катодным пятном, которая примерно равна температуре кипения металла. В качестве варьируемых параметров были приняты радиус катодного пятна, скорость движения пятна и сила тока вакуумной дуги.

В таблице 1 представлены расчетные значения времени нахождения катодного пятна на одном месте от его радиуса и скорости движения.

Табл. 1. Результаты расчетов

$V \setminus r$	$5 \cdot 10^{-5}$ м	$1 \cdot 10^{-5}$ м	$3 \cdot 10^{-6}$ м
1 м/с	$5 \cdot 10^{-5}$ с	$1 \cdot 10^{-5}$ с	$3 \cdot 10^{-6}$ с
10 м/с	$2,5 \cdot 10^{-6}$ с	$5 \cdot 10^{-7}$ с	$1,5 \cdot 10^{-7}$ с
100 м/с	$1 \cdot 10^{-6}$ с	$2 \cdot 10^{-7}$ с	$6 \cdot 10^{-8}$ с

Рассчитанные распределения температуры от поверхности под катодным пятном представлены на рисунке 1. Поверхностью в данном случае считается самая глубокая точка расплавленной лунки.

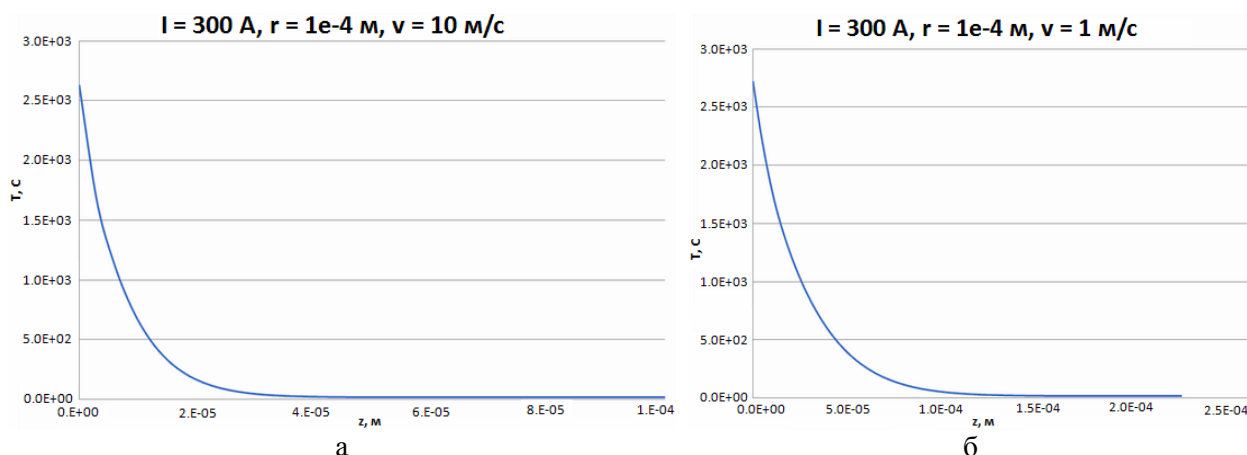


Рис. 1. Зависимость температуры от расстояния от поверхности под катодным пятном при различной скорости движения катодного пятна: а – $v = 10 \text{ м/с}$; б – $v = 1 \text{ м/с}$

Катодное пятно вакуумно-дугового разряда, перемещаясь по поверхности катода, воздействует на нее как локализованный, высококонцентрированный источник энергии. Температура материала на поверхности в зоне пятна, как правило, превышает температуру кипения. При скорости движения на уровне десятков метров в секунду зона теплового воздействия на металл вокруг катодного пятна незначительна. Расчеты показывают, что распределение температуры от поверхности под катодным пятном является резко падающим

и на расстоянии, равном радиусу пятна, температура приближается к температуре основной массы металла.

Неравномерность нагрева поверхности за счет неуправляемого характера перемещения катодных пятен приводит к формированию напряженно-деформированного состояния в материалах. Поэтому исследование тепловых процессов и процессов управления движением катодных пятен по поверхности должны рассматриваться взаимосогласованно. На основе разработанной математической модели теоретически обоснован и впервые экспериментально обнаружен эффект восстановления пластически деформированной формы внутренней поверхности металлического цилиндра при обработке ее катодными пятнами вакуумно-дугового разряда [8]. Процесс восстановления формы изделия экспериментально изучался на внутренней поверхности корпуса буксы железнодорожного вагона. Приближенная аналитическая модель позволила получить оценку температуры внутренней поверхности цилиндра, при которой возможно уменьшение овальности и параметры этого уменьшения. При этом встал вопрос, что будет происходить с кольцом подшипника, который находится внутри корпуса буксы, если его наружную поверхность также обработать катодными пятнами вакуумно-дугового разряда.

При вакуумно-дуговой обработке происходит значительный нагрев поверхностного слоя, приводящий к пластическому деформированию последнего, и при остывании происходит разгрузка всего кольца, но из-за наличия пластических деформаций появляется поле остаточных напряжений. Поле остаточных напряжений и пластические деформации приповерхностного слоя меняют геометрию кольца. Степень изменения геометрии зависит от величины остаточных напряжений. Пластическое деформирование при локальном нагреве происходит при температурах выше 300°C . Нагрев поверхности осуществляется в области катодного пятна, имеющего значительно меньшую поверхность (диаметр пятна порядка сотых-десятых долей миллиметра) по сравнению с площадью кольца, причем длительность горения разряда в зоне пятна составляет микросекунды. Эта нестационарная задача решалась методом конечных элементов в пакете ANSYS с выбором восьмиузлового элемента PLANE223, приспособленного для решения связанных задач термопластичности. В качестве материала была выбрана сталь ШХ15 после закаливания токами высокой частоты, т.е. с пределом текучести порядка 700 МПа со слабой зависимостью предела текучести от температуры [9].

В качестве модельной задачи рассмотрим осесимметричный нагрев всей внешней поверхности кольца подшипника. Разряд горит между внешней поверхностью кольца подшипника и электродом-анодом шириной 30 мм, который движется вдоль внешней поверхности кольца со скоростью 2 об/мин. На рисунке 2 изображена конечноэлементная модель кольца подшипника:

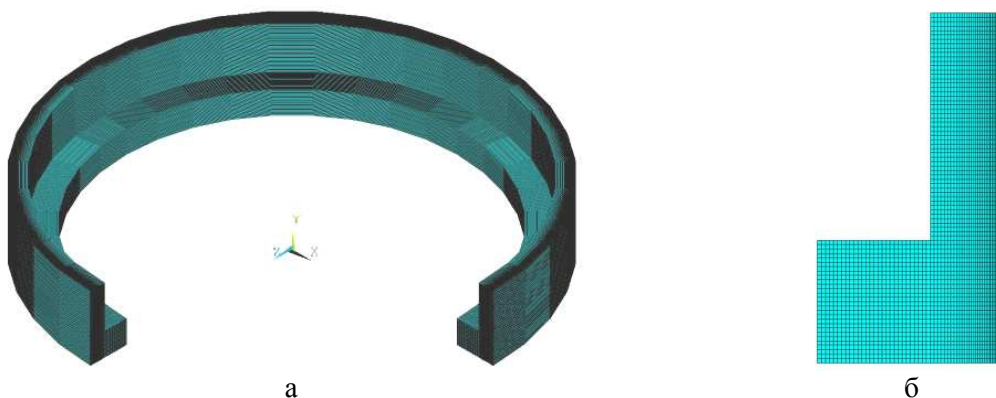


Рис. 2. Конечноэлементная модель кольца подшипника:
а) 3/4 объемной модели; б) двумерная осесимметричная модель

При разбиении области на конечные элементы учитывалось, что температурные эффекты локализованы вблизи внешней поверхности. Поэтому выбиралась неравномерная

сетка со сгущением к внешней поверхности [10]. К внешней поверхности прикладывалась тепловая нагрузка на одну секунду, а затем область остывала до комнатной температуры. На рисунке 3 представлено распределение температуры по сечению кольца после первого шага, а на рисунке 4 представлено распределение радиальных перемещений после прогрева.

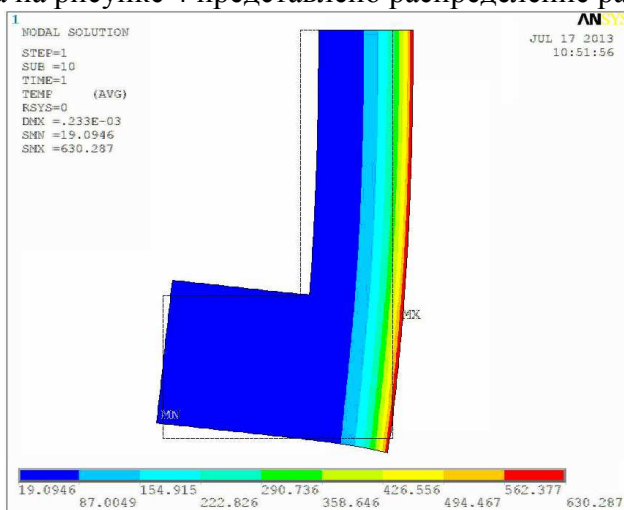


Рис. 3. Распределение температуры по сечению кольца после первого шага

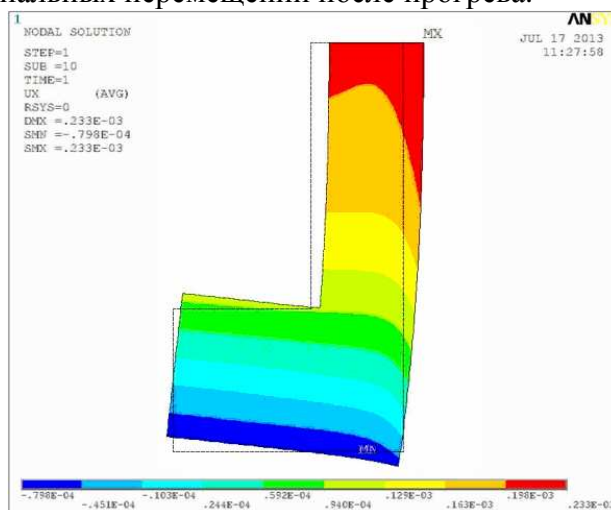
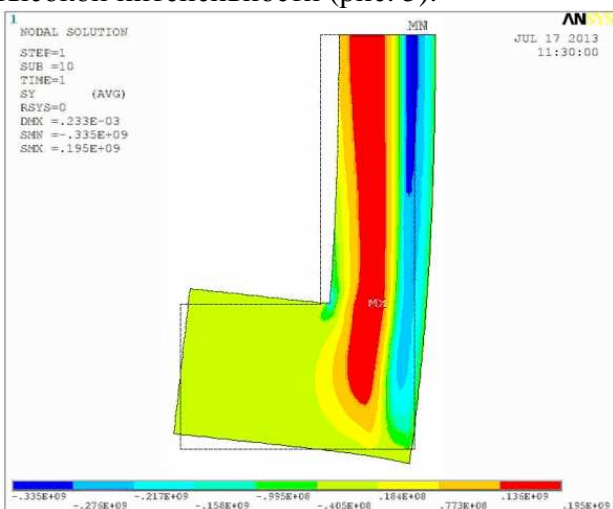
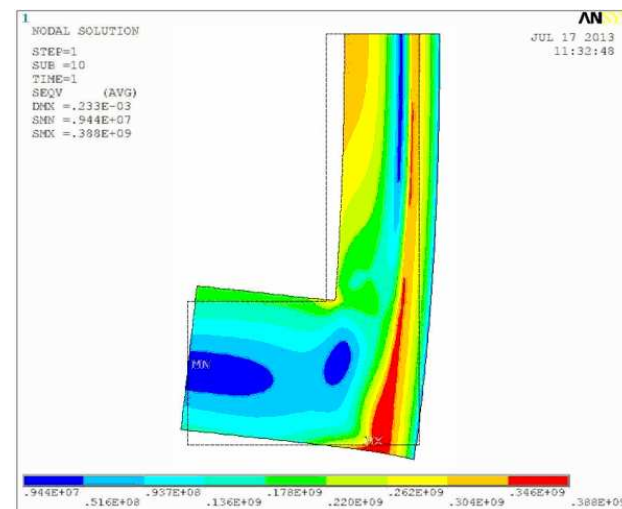


Рис. 4. Распределение радиальных перемещений после прогрева

Неравномерное распределение температуры вызывает появление термоупругих напряжений и приводит к изгибу. Из-за неравномерности распределения температуры по радиусу вблизи внешней поверхности кольца возникают сжимающие напряжения достаточно высокой интенсивности (рис. 5).



а



б

Рис. 5. Распределение напряжений (а) и напряжений Мизеса после прогрева (б)

Так как их уровень превышает предел текучести при данной температуре, то происходит пластическое деформирование приповерхностного слоя с отрицательными пластическими деформациями (рис. 6). Это поле пластических деформаций и приводит к тому, что после остывания геометрия кольца меняется (рис. 6).

При остывании кольца из-за пластического деформирования приповерхностной области при нагревании происходит не полная разгрузка области, что приводит к появлению остаточных напряжений и к изменению формы кольца. На рисунке 7 приведены распределения продольных напряжений (вдоль оси y) по сечению после остывания.

Видно, что при остывании кольца в приповерхностной зоне возникают большие растягивающие напряжения порядка 390 МПа. Они вызывают изгиб кольца, т.е. форма

кольца при этом меняется. Анализ приведенных результатов показывает, что изгибная жесткость кольца подшипника зависит от утолщений на краях кольца подшипника.

Выводы

Анализ результатов проведенного конечно-элементного моделирования вакуумно-дуговой обработки внешней поверхности кольца подшипника показал, что после остывания цилиндрическая форма кольца сохраняется, однако из-за необратимости пластических деформаций возникает поле остаточных напряжений, приводящее к изменению размеров кольца, т.е. внешняя поверхность наружного кольца подшипника растянута, а внутренняя – сжата. Этим обусловлено возможное уменьшение внутреннего радиуса кольца. Показано, что при уменьшении времени горения разряда, при сохранении подводимой мощности уменьшается глубина зоны. Так при нагреве участка шириной 10 мкм в течение 20 мкс зона прогрева, в которой наблюдаются пластические деформации, имеет глубину не более 15 мкм. После остывания до начальной температуры в течение 200 сек максимальные отклонения от первоначальной формы не превышают 0,1-0,2 мкм, несмотря на наличие необратимых пластических деформаций в зоне прогрева.

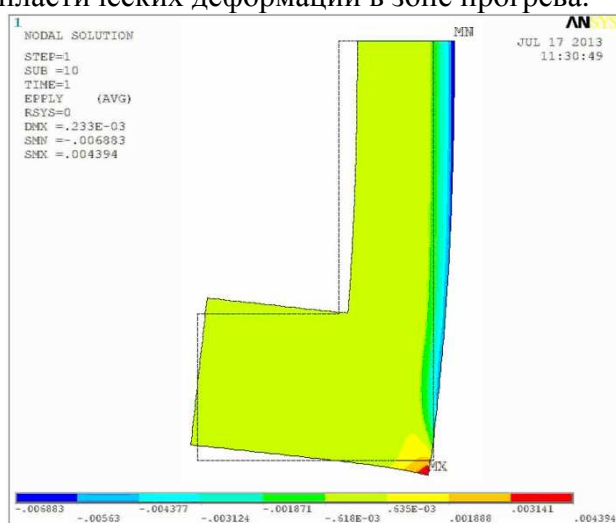


Рис. 6. Поле пластических деформаций после однократного нагревания

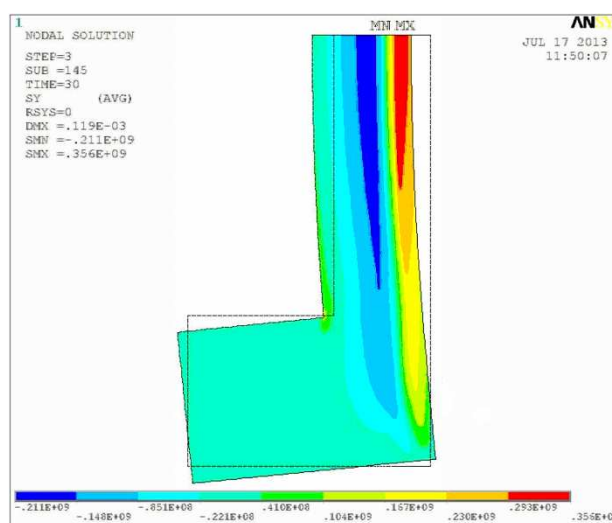


Рис. 7. Распределение продольных напряжений (по y) по сечению после остывания

Таким образом, при вакуумно-дуговой обработке внешней поверхности кольца подшипника отклонение окончательной формы подшипника от первоначальной не превосходит нескольких долей микрона. Следовательно, формоизменением наружного кольца подшипника после охлаждения до начальной температуры можно пренебречь.

Благодарности и финансирование. Исследование выполнено в рамках государственного задания (номер госрегистрации 121112500321-1).

Список литературы

1. Крымов Д.В., Кузнецов В.Г., Курбанов Т.А., Стрыков В.А. Технологические особенности вакуумно-дуговой очистки поверхности конструкционных материалов на малогабаритных установках с форвакуумной откачкой // Вакуумная техника и технология. – 2012. – Т. 22, № 2. – С. 123-127.
2. Кузнецов В.Г. Использование катодного пятна вакуумной дуги для поверхностной закалки металлов // Вакуумная техника и технология. – 2009. – Т. 19, № 2. – С. 81-84.
3. Кузнецов В.Г., Курбанов Т.А., Крымов Д.В., Пониматкин В.П. Восстановление формы пластически деформированной поверхности под действием обработки катодными пятнами вакуумно-дугового разряда // Вакуумная техника и технология. – 2014. – Т. 23, №1. – С. 78-81.
4. Немчинский В.А. О причине перемещения катодного пятна вакуумной дуги и оценка скорости ретроградного движения в магнитном поле // Журнал технической физики. – 1983. – Т. 53, № 2. – С. 241-250.
5. Мойжес Б.Я., Немчинский В.А. К теории движущегося катодного пятна вакуумной дуги // Журнал технической физики. – 1984. – Т. 54, № 1. – С. 13-18.

6. Гришин С.Д., Марахтанов М.К. Состояние и перспективы плазменной обработки материалов // Плазменные энергетические установки. – М.: МВТУ, 1981. – №355. – С. 30-38.
7. Бабичев А.П., Бабушкина Н.А., Братковский А.М. и др. Физические величины: Справочник / Под ред. И.С. Григорьева, Е.З. Мейлихова. – М.: Энергоатомиздат, 1991. – 1232 с.
8. Kuznetsov V.G. Analysis of stresses and deformations in a hollow cylinder under the influence of internal pressure and field of temperature // Journal of Advanced Research in Technical Science. 2020, no. 22, pp. 16-21.
9. Сорокин В.Г., Волоскипова А.В., Вяткин С.А. и др. Марочник сталей и сплавов / Под общ. ред. В.Г. Сорокина. – М.: Машиностроение, 1989. – 640 с.
10. Новацкий В. Теория упругости. – М.: Мир, 1975. – 872 с.

References

1. Krymov D.V., Kuznetsov V.G., Kurbanov T.A., Strykov V.A. Technological features of vacuum-arc surface cleaning of structural materials on small-sized installations with pre-vacuum pumping // Vacuum engineering and technology. 2012, vol. 22, no. 2, pp. 123-127.
2. Kuznetsov V.G. The use of a cathode spot of a vacuum arc for surface hardening of metals // Vacuum technique and technology. 2009, vol. 19, no. 2, pp. 81-84.
3. Kuznetsov V.G., Kurbanov T.A., Krymov D.V., Ponimatkin V.P. Restoration of the shape of a plastically deformed surface under the action of treatment with cathode spots of a vacuum arc discharge // Vacuum engineering and Technology. 2014, vol. 23, no. 1, pp. 78-81.
4. Nemchinsky V.A. About the reason for the movement of the cathode spot of the vacuum arc and the estimation of the speed of retrograde motion in a magnetic field // Journal of Technical Physics. 1983, vol. 53, no. 2, pp. 241-250.
5. Moizhes B.Ya., Nemchinsky V.A. To the theory of a moving cathode spot of a vacuum arc // Journal of Technical Physics. 1984, vol. 54, no. 1, pp. 13-18.
6. Grishin S.D., Marakhtanov M.K. The state and prospects of plasma processing of materials // Plasma power plants. – М.: МВТУ, 1981. – No. 355. – P. 30-38.
7. Babichev A.P., Babushkina N.A., Bratkovsky A.M., etc. Physical quantities: Handbook / Edited by I.S. Grigoriev, E.Z. Meilikhova. – М.: Energoatomizdat, 1991. – 1232 p.
8. Kuznetsov V.G. Analysis of stresses and deformations in a hollow cylinder under the influence of internal pressure and field of temperature // Journal of Advanced Research in Technical Science. 2020, no. 22, pp. 16-21.
9. Sorokin V.G., Volosnikova A.V., Vyatkin S.A., etc. Vintage of steels and alloys / Under the general editorship of V.G. Sorokin. – М.: Mechanical Engineering, 1989. – 640 p.
10. Novatsky V. Theory of elasticity. – М.: World, 1975. – 872 p.

Сведения об авторах:

Information about authors:

Кузнецов Вячеслав Геннадьевич – доктор технических наук, заведующий лабораторией	Kuznetsov Viacheslav Gennadievich – doctor of technical science, head of laboratory
kvg-ipme@yandex.ru	

Получена 30.11.2022