

of contact interaction between diamond-containing mineral ceramics and ceramics in a wide range of loads is proposed. Relations were obtained for calculating the coefficient of friction and critical pressure corresponding to a change in the type of deformation of the composite material.

Keywords: diamond-containing mineral ceramics, antifriction properties, contact interaction model, microstrength, friction, wear.

УДК 621.3

doi:10.18720/SPBPU/2/id24-243

Д.Р. Сальников^{1,2}

¹Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого,

²НТК «Новые технологии и материалы»

Санкт-Петербург, Россия. danya2161@mail.ru

ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ ОСТАТОЧНЫХ НАПРЯЖЕНИЙ В МЕТАЛЛЕ НА ФОРМУ ОТПЕЧАТКА ПОСЛЕ НАНОИНДЕНТИРОВАНИЯ

Аннотация

В работе изучалось влияние остаточных напряжений на форму отпечатка после наноиндентирования. В качестве исследуемого материала использовались валы из стали 20Х13, поверхность которых подверглась операции обкатки. Кроме того, применялся метод конечных элементов. Результаты исследований показали, что замер искажения отпечатка после наноиндентирования в напряжённом металле может выступать в качестве метода определения остаточных напряжений.

Ключевые слова: остаточные напряжения, индентирование, отпечаток, метод конечных элементов

Введение

Остаточными напряжениями называют напряжения, возникшие и оставшиеся в материале в результате самых различных видов внешнего воздействия – термообработка, деформация, сварка, механическая обработка. Кроме того, остаточные напряжения могут появляться в металле в процессе его кристаллизации из жидкого состояния. Остаточные напряжения в материалах конструкций могут быть вредны и даже опасны при эксплуатации, поэтому так важна разработка новых и совершенствование старых методов фиксирования и определения характера данного вида напряжений в материалах. Одним из таких методов может стать уже известный и широко распространённый метод инструментального вдавливания или индентирования.

Тем не менее, для более глубокого исследования влияния остаточных напряжений на процесс вдавливания и его результаты обычного индентирования образцов с наведёнными остаточными напряжениями может быть недостаточно. Для решения данной задачи может пригодиться математическое моделирование и конкретно – метод конечных элементов.

Методы математического моделирования позволяют проводить эксперименты и исследования самых различных процессов, в том числе и металлургических, без больших финансовых затрат. Тем не менее, математическое моделирование может требовать большого количества вычислений и занимать

много времени. В этом случае на помощь приходит метод конечных элементов. Метод конечных элементов (МКЭ) — это численный метод решения дифференциальных уравнений с частными производными, а также интегральных уравнений, возникающих при решении задач прикладной физики.

Целью данной работы является попытка определения влияния остаточных напряжений на геометрию отпечатка после индентирования.

Методы и материалы

В качестве материала для проведения исследования были использованы образцы, вырезанные из макетов судовых валов, подвергшихся поверхностному упрочнению. Валы изготовлены из стали марки 20X13 (Рис. 1).



Рисунок 1 – Образцы поперечного сечения валов, марка стали 20X13

Для измерения микротвердости использовался цифровой микро-твердомер Buehler MicroMet 5103 с наконечником Виккерса (Рис. 2). Испытания проводились при нагрузке 2 Н, которая прикладывалась в течение 10 секунд. Микротвердость измерялась по линии перпендикулярной поверхности образца, расстояние между замерами микротвердости выдерживалось в интервале 100-500 мкм.



Рисунок 2 – Микро-твердомер Buehler MicroMet 5103 с индентором Виккерса

В данной работе была разработана модель инструментального вдавливания по Виккерсу, то есть в качестве индентора использовалась четырёхгранная пирамидка с углом в вершине в 136° . Модель состояла из 55487 элементов и 407472 степеней свободы. Для расчётов применялось программное обеспечение Abaqus/CAE. [7].

Параметры материала исследуемой заготовки задавались в соответствии с реальными механическими свойствами стали марки 20Х13. В месте контакта индентора с образцом сетка измельчалась (Рис. 3) с целью получения более точных результатов.

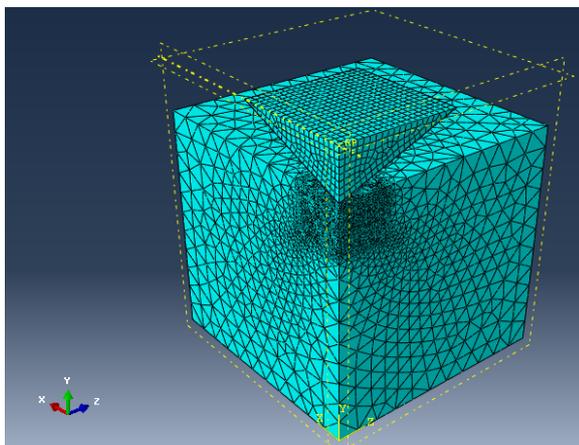


Рисунок 3 – Визуальное изображение исследуемой модели с сеткой конечных элементов, используемой для анализа

Для упрощения расчёта модель геометрически представляет собой лишь одну четвертую от реального процесса наноиндентирования (Рис. 3). Это допустимо в связи с установленной схемой остаточных напряжений и геометрической формой индентора.

Результаты и обсуждение

Результаты моделирования процесса индентирования материала с наведёнными в нём плоскими двухосевыми остаточными напряжениями представлены на рисунке 4. На данном графике представлены максимальная глубина проникновения индентора в материал и глубина отпечатка в зависимости от степени и знака остаточных напряжений, представленных в образце. Данные величины были рассчитаны относительно значений, полученных после индентирования образца без остаточных напряжений. Как видно из графика на рисунке 4 сжимающие остаточные напряжения препятствуют проникновению индентора в металл, а в случае с растягивающими – ситуация обратная. Стоит также отметить, что данный параметр более чувствителен к растягивающим остаточным напряжениям (особенно при значениях, близких к пределу текучести материала) нежели к сжимающим.

Также были проведены исследования остаточных сжимающих и растягивающих напряжений, которые прикладывались исключительно по оси X (Рис. 5).

Степень искажения отпечатка была рассчитана с помощью следующего уравнения:

$$I = \frac{X_1 - Z_1}{Z_1} * 100, \quad (1)$$

где X_1 – значение координаты точки X_1 по оси X,
 Z_1 - значение координаты точки Z_1 по оси Z.

Как и ожидалось, растягивающие напряжения, приложенные по оси X, вытягивают отпечаток, а сжимающие – сдавливают. Однако степень влияния остаточных напряжений разного знака неодинакова, как видно из рисунка 6. Растягивающие напряжения имеют гораздо более выраженное влияние на

геометрию отпечатка, нежели сжимающие.

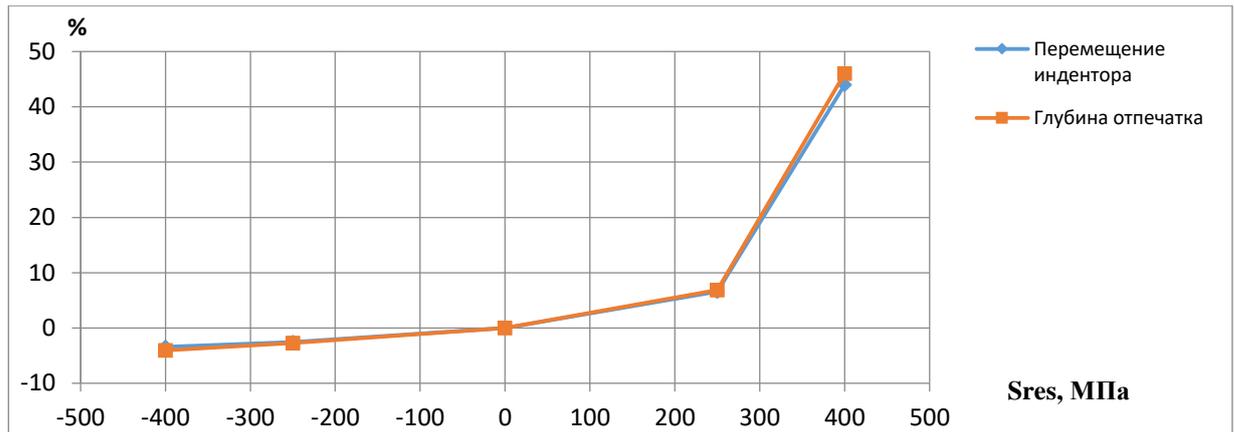


Рисунок 4 - Зависимость глубины проникновения индентора в образец и глубины отпечатка после индентирования от величины и знака остаточных напряжений

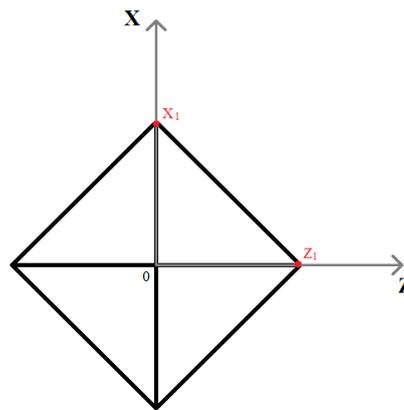


Рисунок 5 - Схема отпечатка с наглядным отображением местоположения координат, которые использовались для расчёта степени искажения отпечатка

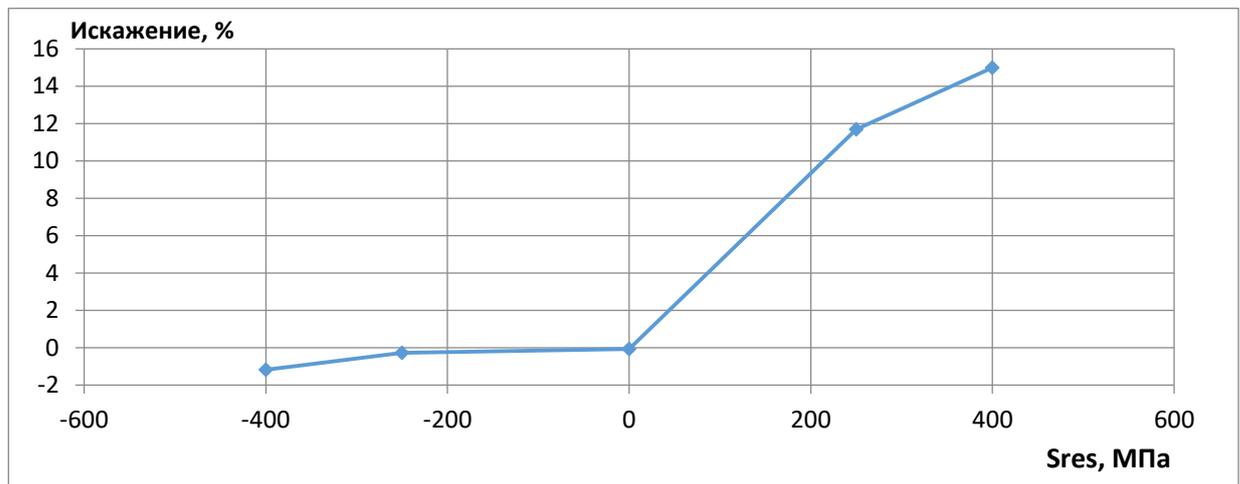


Рисунок 6 - Зависимость степени искажения отпечатка от величины и знака остаточных напряжений

Далее проводилось индентирование поперечного среза валов, после процесса их обкатки. После чего полученные отпечатки исследовались на предмет искажения.

На рисунке 7 представлено схематичное изображение поперечного среза вала с отпечатком. Если в случае математического моделирования остаточные напряжения прикладывались по оси X (Рис. 5) и соответственно искажение отпечатка считалось по направлению оси X, то в данном случае исследуется влияние

тангенсальных остаточных напряжений на форму отпечатка после индентирования, то есть степень искажения считалась вдоль направления вышеуказанных напряжений.

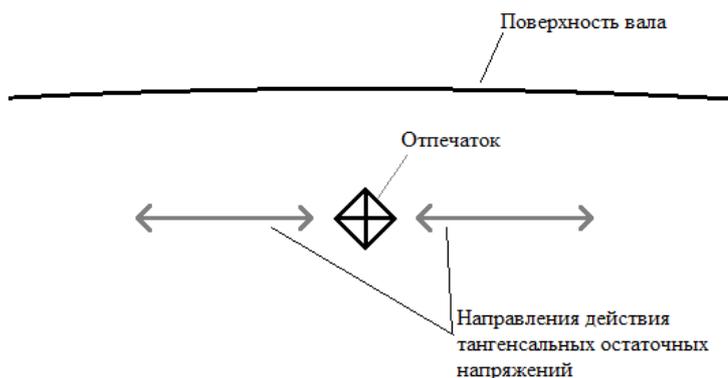


Рисунок 7 – Схематическое изображение расположения отпечатка и направлений действия тангенсальных остаточных напряжений на поперечном срезе вала

Отпечатки ставились один за другим с определённым интервалом в направлении от поверхности к оси вала. Эта процедура позволила проследить зависимость степени искажения полученных отпечатков в зависимости от расстояния от поверхности вала. Данная зависимость может представлять интерес, так как из предыдущих исследований данных валов известно, что остаточные напряжения после процесса обкатки имеют неоднородный характер по глубине.

Результаты исследования искажения отпечатков, нанесённых на поперечные срезы обкатанных валов представлены на рисунках 8 и 9.

Как видно из зависимостей на рисунках 8 и 9 степень искажения отпечатков падает при удалении от края образца, что свидетельствует о наличии растягивающих остаточных напряжений вблизи поверхности обкатанных валов и их переходе в сжимающие при удалении от поверхности в сторону центра вала, что соответствует раннее полученным результатам исследований остаточных напряжений в данных макетах судовых валов после обкатки.

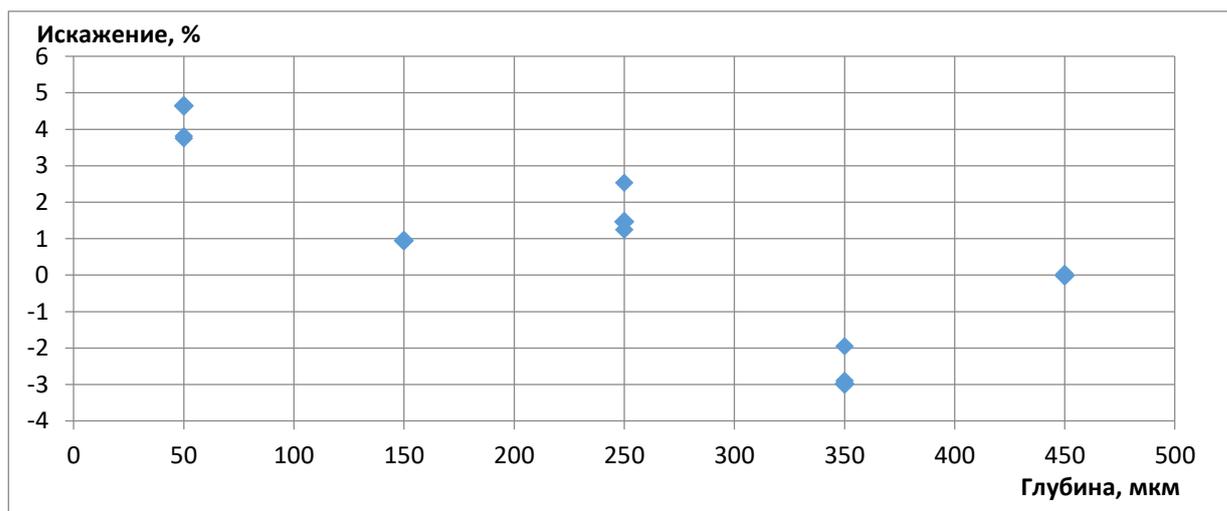


Рисунок 8 - Степень искажения отпечатков в зависимости от расстояния от края образца. Диаметр вала 40 мм и усилие обкатки 1750 кгс

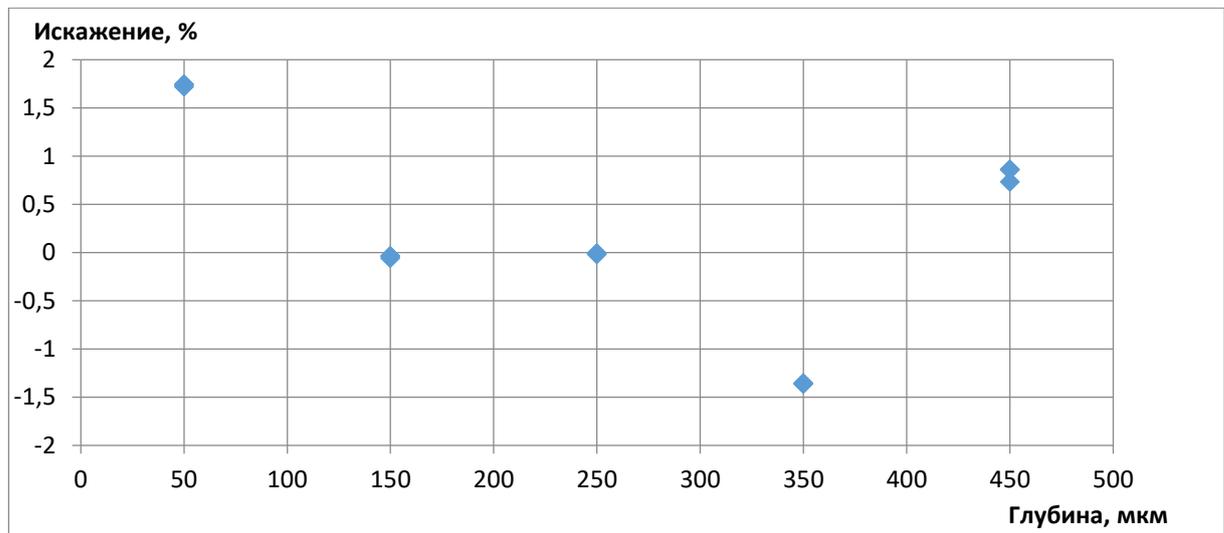


Рисунок 9 - Степень искажения отпечатков в зависимости от расстояния от края образца. Диаметр вала 40 мм и усилие обкатки 1500 кгс

Далее, полученные данные по искажениям отпечатков (Рис. 8 и 9) сопоставлялись с данными полученными после моделирования процесса индентирования материала с остаточными напряжениями (Рис. 6) с целью получения зависимости степени искажения отпечатков от расстояния от поверхности вала. Затем, полученная зависимость сравнивалась с данными о распределении тангенциальных остаточных напряжений по глубине, полученными в результате моделирования процесса обкатки методом конечных элементов. Результаты данного сравнения представлено на рисунке 10.

Сравнение методик на рисунке 10 показывает, что, хоть исследование остаточных напряжений с помощью вычисления степени искажения отпечатка и показывает схожую тенденцию поведения этих самых напряжений по сравнению с методикой конечно-элементного моделирования, но, тем не менее, количественно данные имеют заметное расхождение.

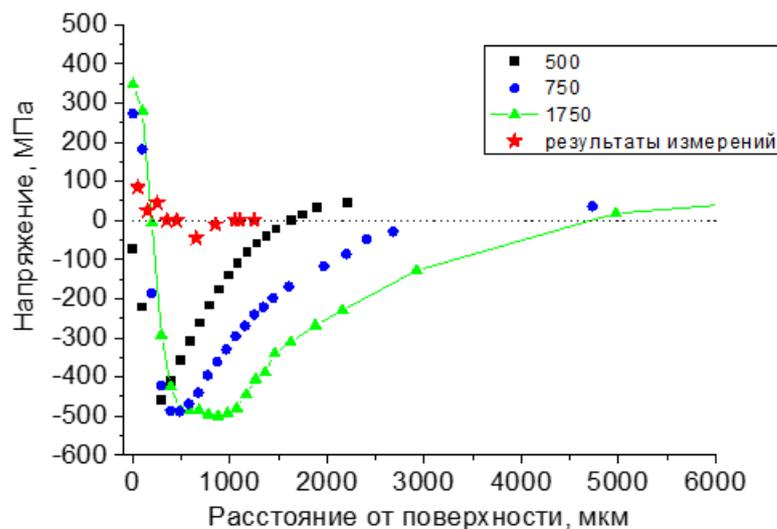


Рисунок 10 – Сопоставление данных о распределении тангенциальных остаточных напряжений в зависимости от расстояния от поверхности обкатанного вала полученных методами конечно-элементного моделирования и измерения искажения отпечатков после индентирования материала валов после процесса обкатки

Заключение

В ходе данной работы были рассмотрены основные теоретические моменты определения остаточных напряжений в материале с помощью испытания инструментальным вдавливанием или индентированием. Было проведено индентирование поперечного сечения обкатанных валов с целью определения влияния величины остаточных напряжений различного знака на степень искажения отпечатков. Кроме того, с помощью метода конечных элементов была разработана математическая модель процесса индентирования материала с наведёнными в нём напряжениями, с целью определения влияния этих самых напряжений на результаты процесса индентирования, такие как глубина проникновения индентора в материал, глубина отпечатка и степень искажения его формы после процесса индентирования. После чего было проведено сравнение результатов, полученных в процессе моделирования и экспериментальных значений искажений отпечатка при индентировании валов. Полученные данные имеют схожую тенденцию с результатами моделирования процесса обкатки в среде Abaqus. Количественные различия можно объяснить тем, что в модели остаточные напряжения наводились по направлению одной или двух осей, в то время как в реальном материале поля остаточных напряжений имеют куда более сложную схему.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Игнатъев А.Г., Третьяков А.А. Деформированное состояние поверхности вокруг отпечатка конического индентора: влияние остаточных напряжений // Вестник ЧГАА. 2014. Том 70. Р. 61-66.
2. ГОСТ Р 57172-2016. Определение поверхностных остаточных напряжений методом инструментального индентирования. – М.: Стандартинформ. 2016.
3. Ямилев М.З., Игнатъев А.Г., Гумеров К.М. Влияние остаточных напряжений на деформированное состояние поверхности вокруг отпечатка конического индентора в оболочковой конструкции // Материалы V международной научно-практической конференции, посвященной 20-летию АО «КАЗТРАНСОЙЛ». 2017. Р. 38-39.
4. Tsui T.Y., Oliver W.C., Pharr G.M. Influences of stress on the measurement of mechanical properties using nanoindentation: Part I. Experimental studies in an aluminum alloy // Mater. Res. 1996. Vol. 11. P. 752-759.
5. Bolshakov A., Oliver W.C., Pharr G.M. Influences of stress on the measurement of mechanical properties using nanoindentation. Part II. Finite-element simulations // Mater. Res. 1996. Vol. 11, № 3. P. 760-768.
6. Suresh S., Giannakopoulos A.E. A New Method for Estimating Residual Stresses by Instrumented Sharp Indentation // Acta mater. 1998. Vol. 46, № 16. P. 5755-5767.
7. ABAQUS/Standard, Theory and User's Manuals, release 6.4-1. 2004. HKS Inc., Pawtucket, RI, USA.
8. Teixeira V., Andritschky M., Fischer W., Buchkremer H.P., Stover D. Analysis of Residual Stresses in Thermal Barrier Coatings // Mater. Process. Technol. 1999. Vol. 92, № 22. P. 209–216.
9. Pharr G.M. Measurement of mechanical properties by ultra-lowload indentation // Mater. Sci. Eng. 1998. Vol 253, № 1. P. 151–159.
10. Pharr G.M., Bolshakov A. Understanding nanoindentation unloading curves // Mater. Res. 2002. Vol. 17, № 10. P. 2660–2671.
11. Bocciarelli M., Maier G. Indentation and imprint mapping method for identification of residual stresses // Com. Mat. Science. 2007. Vol. 39, № 2. P. 381-392
12. Vlassak J.J., Nix W.D. Measuring the elastic properties of anisotropic materials by means of indentation experiments // Mech. Phys. Solids. 1994. Vol. 42, № 8. P. 1223–1245.
13. Chen X., Vlassak J.J. Numerical study on the measurement of thin film mechanical

properties by means of nanoindentation // Mater. Res. 2001. Vol. 16, № 10. P. 2974–2982.

14. Swadener J.G., Taljat B., Pharr G.M. Measurement of residual stresses by load and depth sensing spherical indentation // Mater. Res. 2001. Vol. 16, № 7. P. 2091–2102.

15. Lee Y.H., Kwon D. Estimation of biaxial surface stress by instrumented indentation with sharp indenter // Acta Mater. 2004. Vol. 52, № 6. P. 1555–1563.

D.R. Salnikov^{1,2}.

¹Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University,

²STC «New technologies and materials»,

Saint Petersburg, Russia. danya2161@mail.com

INVESTIGATION OF THE EFFECT OF RESIDUAL STRESSES IN METAL ON THE SHAPE OF THE IMPRINT AFTER NANOINDENTATION

Abstract

The paper studied the effect of the influence of residual stresses on the shape of the imprint after nanoindentation was studied. Shafts made of 20X13 steel, the surface of which was subjected to running-in operation, were used as the material under study. In addition, the finite element method was applied. The results showed that the measurement of the print distortion after nanoindentation in stressed metal could be used as a method for determining residual stresses.

Key words: residual stresses, indentation, imprint, finite element method

УДК 620.199

doi:10.18720/SPBPU/2/id24-244

Г.В. Цветкова, Г.В. Иванова, Э. Мохсени, М. Аль-Наджар, Я. Нагхави
Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого,
Санкт-Петербург, Россия, tsvetkova_gv@mail.ru

МНОГОФАКТОРНЫЙ АНАЛИЗ ТРИБОТЕХНИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК МАТЕРИАЛОВ ПОКРЫТИЙ

Аннотация

Исследование направлено на изучение зависимости триботехнических характеристик материалов покрытий и полученных свойств от способа изготовления покрытий. В эксперименте на сталь 45 наносились слои различных материалов с помощью автоматической электродуговой наплавки, а также использовались лазерные технологии. Изучение триботехнических характеристик показало преимущества лазерных наплавки для лопаток газотурбинных двигателей. Для электродуговых наплавки рекомендуется использование наплавки с керамическим флюсом для повышения качества деталей смесителей. Металлографические исследования показали взаимосвязь между износостойкостью и микротвёрдостью, размером зерна в материале, суммой легирующих элементов.

Ключевые слова: наплавка, износостойкость, микротвёрдость, размер зерна, легирующие элементы.

Введение

Нанесение специальных покрытий на поверхность трущихся