

ЧИСЛЕННЫЙ РАСЧЕТ И АНАЛИЗ НАПРЯЖЕННОГО СОСТОЯНИЯ В СЛОИСТОМ ТЕЛЕ ПРИ ТРЕНИИ С УЧЕТОМ ИЗМЕНЕНИЯ МОДУЛЕЙ УПРУГОСТИ ПОКРЫТИЯ И ОСНОВАНИЯ

В.В. Можаровский¹, В.А. Кукареко², С.А. Марьин¹, А.В. Кушнеров²

¹Гомельский государственный университет имени Франциска Скорины

²Объединенный институт машиностроения НАН Беларуси, Минск

NUMERICAL CALCULATION AND ANALYSIS OF THE STRESS STATE IN A LAYERED BODY DURING FRICTION, TAKEN INTO ACCOUNT THE CHANGES IN THE ELASTIC MODULES OF THE COATING AND BASE

V.V. Mozharovsky¹, V.A. Kukareko², S.A. Marjin¹, A.V. Kushnerou²

¹Francisk Skorina Gomel State University

²The Joint Institute of Mechanical Engineering of the National Academy of Sciences of Belarus, Minsk

Аннотация. Представлены результаты исследований о численном моделировании, с помощью метода конечных элементов, расчета и анализа напряженного состояния в слоистом теле (изотропное упругое покрытие на упругом основании) при взаимодействии цилиндрического индентора с упругим покрытием с учетом трения. Исследование направлено на изучение механизма износостойкости высокохромистых сталей, модифицированных ионами азота при различных температурах.

Ключевые слова: напряжения, покрытия, контактное взаимодействие, метод конечных элементов, трение.

Для цитирования: Численный расчет и анализ напряженного состояния в слоистом теле при трении с учетом изменения модулей упругости покрытия и основания / В.В. Можаровский, В.А. Кукареко, С.А. Марьин, А.В. Кушнеров // Проблемы физики, математики и техники. – 2024. – № 1 (58). – С. 22–28. – DOI: https://doi.org/10.54341/20778708_2024_1_58_22. – EDN: THNZPU

Abstract. The results of the studies on numerical modeling, using the finite element method, calculation and analysis of the stress state in a layered body (an isotropic elastic coating on an elastic base) during the interaction of a cylindrical indenter with an elastic coating taking into account friction are presented. The research is aimed at studying the mechanism of wear resistance of high-chromium steels modified with nitrogen ions at different temperatures.

Keywords: stress, coating, contact interaction, finite element method, friction.

For citation: Numerical calculation and analysis of the stress state in a layered body during friction, taken into account the changes in the elastic modules of the coating and base / V.V. Mozharovsky, V.A. Kukareko, S.A. Marjin, A.V. Kushnerou // Problems of Physics, Mathematics and Technics. – 2024. – № 1 (58). – P. 22–28. – DOI: https://doi.org/10.54341/20778708_2024_1_58_22 (in Russian). – EDN: THNZPU

Введение

В классических моделях изнашивания слоистых тел рассматриваются механизмы пластической деформации и разрушения упрочненных поверхностных слоев, однако при этом не учитываются особенности их сопряжения с подложкой. Вместе с тем уровни напряжений, действующих при трении на границе раздела между упрочненным слоем и основой, могут превышать напряжения текучести материала основания. В результате этого при трении в материале основы, имеющем, как правило, существенно более низкие механические свойства, могут накапливаться пластические сдвиги, способствующие формированию растягивающих напряжений в упрочненном поверхностном слое материала и приводящие к образованию в нем трещин [1]–[3].

В частности, при исследовании износостойкости высокохромистых сталей, модифицированных ионами азота при различных температурах, было показано, что упрочненные слои малой толщины (до 5–6 мкм) не обеспечивают повышения износостойкости стали в условиях трения без смазочного материала [2], [3].

1 Методика эксперимента

В основе построения численного эксперимента, моделирующего расчет напряженно-деформированной трибологической системы «скользящий цилиндрический индентор – упругое изотропное покрытие на упругом основании», лежат натурные экспериментальные исследования, проведенные в ОИМ НАН Беларуси. Экспериментальные исследования проводились на образцах

аустенитной стали X17H13M2T с упрочненной ионами азота при температурах 670 и 770 К поверхностью. Микроструктура образца азотированной при 670 К стали представлена на рисунке 1.1. Глубина модифицированного азотом при 670 К слоя составляла 6 мкм (микротвердость 800–850 HV 0,025). После обработки при 770 К глубина азотированного слоя составляла 17–18 мкм, а микротвердость – 1200 HV 0,025. Микротвердость основания / подложки составляла 200 HV 0,025.

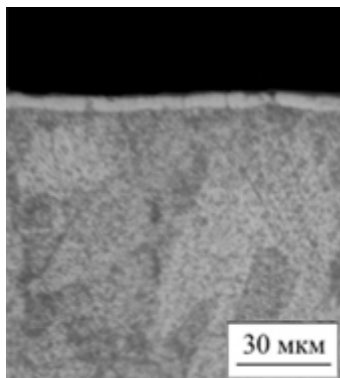


Рисунок 1.1 – Микроструктура стали X17H13M2T, подвергнутой ионно-лучевому азотированию при 670 К, 2 ч

В результате триботехнических испытаний (рисунок 1.2) установлено, что в процессе трения без смазочного материала модифицированной ионами азота при 670 К стали X17H13M2T на начальной стадии испытаний регистрируется малый износ и интенсивность линейного изнашивания упрочненного слоя составляет $I_h \approx 6-7 \cdot 10^{-9}$. После износа упрочненного слоя толщиной ≈ 1 мкм и уменьшения толщины оставшегося азотированного слоя до ≈ 5 мкм регистрируется аномально сильное возрастание износа и увеличение I_h до $70 \cdot 10^{-9}$. В случае испытаний азотированной при 770 К стали X17H13M2T на всем пути трения не регистрируется существенного увеличения интенсивности линейного изнашивания толстого азотированного слоя (рисунок 1.2), составляющей $5-7 \cdot 10^{-9}$. Подобные закономерности изнашивания также регистрируются при сухом трении модифицированных ионами азота аустенитных сталей типа 12X18H10T [3] и высокохромистой стали 40X13 [2]. По данным работ [2], [3] ускоренное изнашивание тонких азотированных слоев является следствием протекания при трении процессов пластической деформации в неупрочненной основе/подложке, что приводит к возникновению растягивающих напряжений в упрочненном поверхностном слое, которые вызывают его ускоренное разрушение в процессе трения. При большой толщине упрочненного слоя (8–20 мкм) нагрузка на пластичную основу при трении незначительна и в ней не протекают

акты пластической деформации, что обеспечивает высокую износостойкость слоистого материала. При этом было обнаружено, что модули упругости модифицированных ионами азота слоев могут существенно различаться. В частности, в случае ионной обработки аустенитной высокохромистой стали

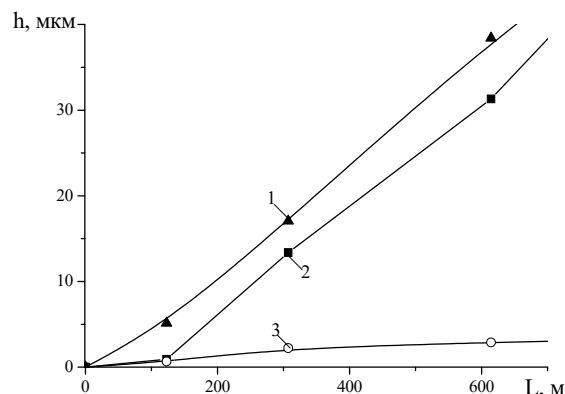


Рисунок 1.2 – Зависимость величины линейного износа h от пути трения L стали X17H13M2T, обработанной ионами азота по различным режимам (трение без смазки; $P = 1$ МПа), 1 – исходное состояние; 2 – обработка N^+ 670 К; 3 – то же при 770 К

12X18H10T при 670 К значение E поверхностного слоя составляет ≈ 175 ГПа [4], а при высоких температурах азотирования (≥ 770 К) $E \approx 360$ ГПа, при этом модуль упругости стальной подложки (основы) составлял $E = 200$ ГПа. Можно полагать, что различие в значениях модулей упругости азотированного слоя и основы может оказывать существенное влияние как на распределение напряжений в слоистом материале, так и на его износостойкость. При этом экспериментальные данные, полученные в [1]–[3], не позволяют представить полную картину о влиянии значений модулей упругости упрочненного слоя и подложки для различных толщин покрытия на закономерности изнашивания слоистых материалов. Вместе с тем, численные методы дают возможность подробно описать напряженно-деформированное состояние градиентных (слоистых) материалов в зависимости от модулей упругости модифицированного слоя и подложки [5]–[12], что позволит оценить влияние этого фактора на износостойкость материалов. Известно, что на современном этапе развития расчетных методов, многие трибологические системы контактного взаимодействия, а также сложные гетерогенные материалы пар трения, элементы которых содержат упрочненные и функционально-градиентные материалы, рассчитываются с помощью различных численных программ, базирующихся на методах конечных элементов (МКЭ) [5]–[12]. Особенность этих программ

состоит в том, что необходимо создавать дискретизацию области, вводить граничные условия, кроме того могут возникать значительные ошибки расчета, если рассматриваемая область достаточно мала (в сравнении с сеткой разбиения), а также в областях с большими концентрациями напряжений. Указанные особенности расчетов также касаются упругих тел, взаимодействующих с другими телами, имеющими относительно тонкое покрытие, полученное, например, методами химико-термической обработки, ионного легирования, вакуумно-дугового осаждения. В частности, такое взаимодействие реализуется в процессе трения материалов с покрытиями в триботехнических узлах различных механизмов. Вместе с тем численные методы дают возможность достаточно подробно описать напряженно-деформированное состояние слоистых материалов при трении и прогнозировать закономерности их изнашивания, что является актуальной задачей физического материаловедения.

Целью настоящей работы является моделирование методом конечных элементов напряженно-деформированного состояния упрочненного слоя (покрытия) и подложки с различными соотношениями значений их модулей упругости для дальнейшего применения разработанной модели к исследованию износостойкости материалов с твердыми слоями. При этом использовалась процедура конечно-элементного моделирования, включающая: дискретизацию (разбивка исследуемой области на элементы); решение системы линейных алгебраических уравнений, получаемых из уравнений равновесия, минимума функционала и др. Анализ распределений напряжений, перемещений, энергии деформирования производился построенной программой МКЭ. В результате расчета получены компоненты на-

пряженного состояния слоя (покрытия) и подложки.

Для реализации *численного эксперимента* рассмотрена задача математического моделирования процесса контактного взаимодействия цилиндрического индентора при трении с определением напряженного состояния в упругом покрытии и в полупространстве с покрытием при действии граничных нормальных и касательных нагрузок в случае плоской деформации и с неодинаковыми значениями модуля упругости для покрытия и для основания. Расчет производился с использованием метода конечных элементов (МКЭ). На рисунке 1.3 приведена схема разбивки исследуемого образца.

В результате численных расчетов было отмечено, что для разных отношений a/h , при отсутствии трения в области контакта, достаточно точно можно описать распределение давления зависимостью $p(x) = p_0(a^2 - x^2)^k$. Тогда, используя условие равновесия, имеем уравнение для определения зоны контакта:

$$P = p_0 \frac{\Gamma(k+1)\sqrt{\pi}}{\Gamma(k+1/2)(k+1/2)} a^{k+1}$$

(в частности при $k=1$, $P = p_0(4/3)a^3$; при

$k=0,5$; $P = p_0 \frac{\pi a^2}{2}$), где Γ – гамма функция, k – параметр, $0,5 \leq k \leq 1$, p_0 – максимальное давление, P – усилие на единицу длины, действующее на индентор. При расчете предполагается, что в зоне контакта давление от индентора (рисунок 1.4) задано и распределено по параболическому закону:

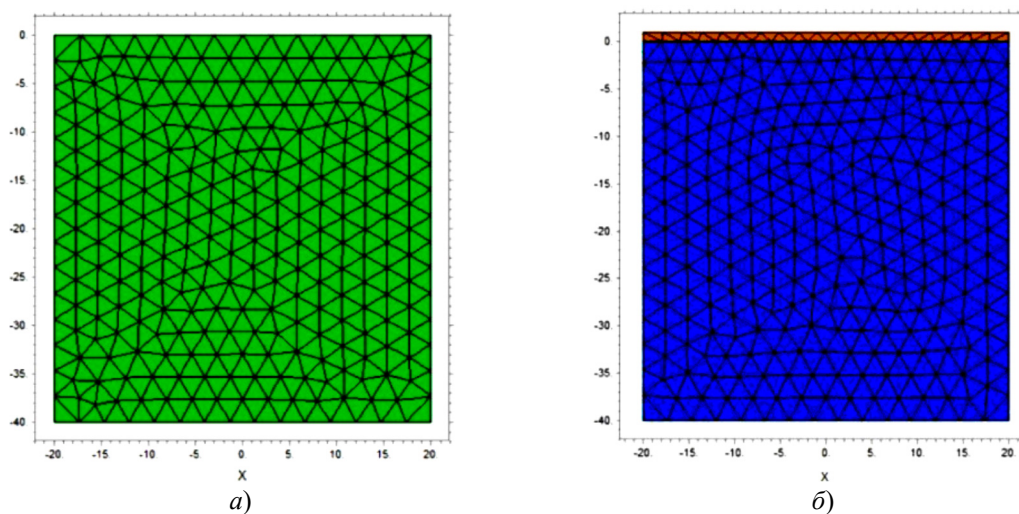


Рисунок 1.3 – Схема разбивки исследуемого образца на МКЭ (a – без упрочненного слоя / покрытием, b – с упрочненным слоем / покрытием)

$$p(x) = p_0 \left(1 - \frac{x^2}{a^2}\right), \quad p_0 = \frac{3P}{4a},$$

p_0 – максимальное давление, P – усилие на единицу длины на индентор. Действие касательных усилий при учете трения в зоне контакта оценивалось в приближении закона Кулона

$$q(x) = f \cdot p(x),$$

где f – коэффициент трения.

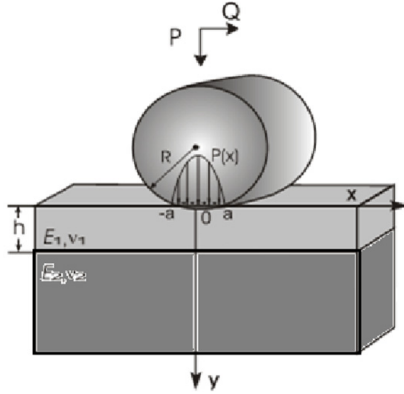


Рисунок 1.4 – Схема цилиндрического индентора, перемещающегося по поверхности слоистого тела и направления действия нормальных $p(x)$ и касательных $q(x)$ усилий в зоне контакта

2 Результаты моделирования

Напряжение в основании/подложке без покрытия. Рассмотрим вначале распределение напряжений в стальном основании без покрытия под действием внешней нагрузки от стального индентора. Согласно теоретическим исследованиям [13] при скольжении цилиндра по поверхности упругого полупространства нормальные и касательные усилия на поверхности изменяются по эллиптическому закону и связаны законом Кулона

$$p(x) = \frac{2P}{\pi a^2} (a^2 - x^2)^{\frac{1}{2}}, \quad q(x) = (\pm) \frac{2fP}{\pi a^2} (a^2 - x^2)^{\frac{1}{2}}.$$

Для произвольных законов распределения граничных нагрузок имеем, согласно [13], компоненты тензора напряжений с нормальными $p(x)$ и касательными $q(x)$ усилиями определяются по зависимостям:

$$\begin{aligned} \sigma_y &= \frac{-2y^3}{\pi} \int_{-a}^a p(s) \left(\frac{1}{((x-s)^2 + y^2)^2} \right) ds - \\ &\quad - \frac{2}{\pi} y^2 \int_{-a}^a q(s) \left(\frac{x-s}{((x-s)^2 + y^2)^2} \right) ds, \\ \sigma_x &= \frac{-2y}{\pi} \int_{-a}^a p(s) \left(\frac{(x-s)^2}{((x-s)^2 + y^2)^2} \right) ds - \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} & - \frac{2}{\pi} \int_{-a}^a q(s) \left(\frac{(x-s)^3}{((x-s)^2 + y^2)^2} \right) ds, \\ \tau_{xy} &= \frac{-2y^2}{\pi} \int_{-a}^a p(s) \left(\frac{x-s}{((x-s)^2 + y^2)^2} \right) ds - \\ & - \frac{2y}{\pi} \int_{-a}^a q(s) \left(\frac{(x-s)^2}{((x-s)^2 + y^2)^2} \right) ds. \end{aligned}$$

Напряжение в покрытии и основании/подложке. Формирование на поверхности основания тонкого упрочненного слоя приводит к существенному перераспределению напряжений от внешней нагрузки, как в покрытии, так и в основании. На рисунке 2.1 показана картина изменения напряженного состояния в упругом теле от внешней нагрузки при формировании на его поверхности покрытия, адгезионно связанного с основанием. Расчет напряжений, возникающих под действием внешних нагрузок, проводился для стального основания без покрытия (модуль упругости $E = 2,0 \cdot 10^{11}$ Па, коэффициент Пуассона $\nu = 0,31$) и для оснований, на поверхность которого наносилось покрытие ($E = 2,83 \cdot 10^{11}$ Па, $\nu = 0,31$). Можно видеть, что присутствие на поверхности основы упрочненного слоя приводит к существенному перераспределению напряжений в основании (рисунок 2.1).

Для приближения результатов моделирования к условиям трения материала с упрочненным слоем, имеющим значение модуля упругости, существенно отличающимся от значения модуля упругости основания, рассматривалась задача о движении индентора по поверхности покрытия с учетом коэффициента трения и для заданной параболической нагрузки. Для наглядного примера о влиянии отношений модулей упругости покрытия и основания на распределение напряжений при трении возьмем $K = E_{\text{пок}} / E_{\text{осн}} = 2, 2; 4, 4; 13, 3$, а коэффициент трения индентора по покрытию $f = 0, 15$, толщина покрытия $h = 1$ мкм, $a = 0, 5$ мкм. Результаты МКЭ моделирования приведены на рисунке 2.2.

Анализируя данные моделирования, приведенные на рисунке 2.2, можно отметить, что при возрастании K точка максимальных напряжений смещается от поверхности в глубину покрытия, вследствие чего износ покрытия может несколько уменьшаться при больших K . Следует также отметить, что в результате действия касательных усилий на поверхности, даже для однородного материала, возникают разрушающие напряжения, которые зависят от коэффициента трения и располагаются вблизи поверхности (более подробное описание роли трения на изменения картины напряженного состояния в однородном

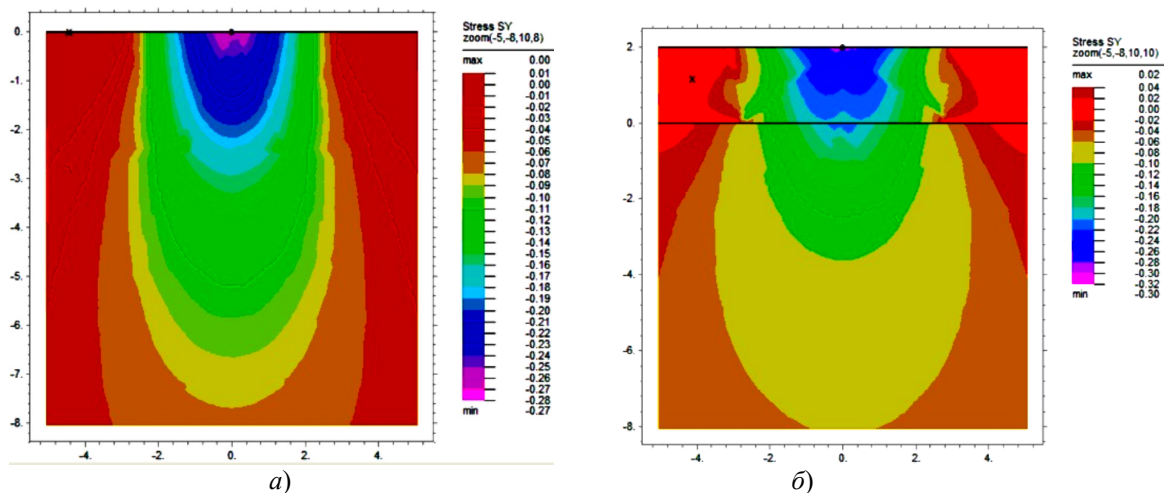


Рисунок 2.1 – Изменение напряженного состояния σ_y (здесь, $a = 2,5$ мкм, $h = 2$ мкм):

a – в полуплоскости; b – в покрытии с основанием

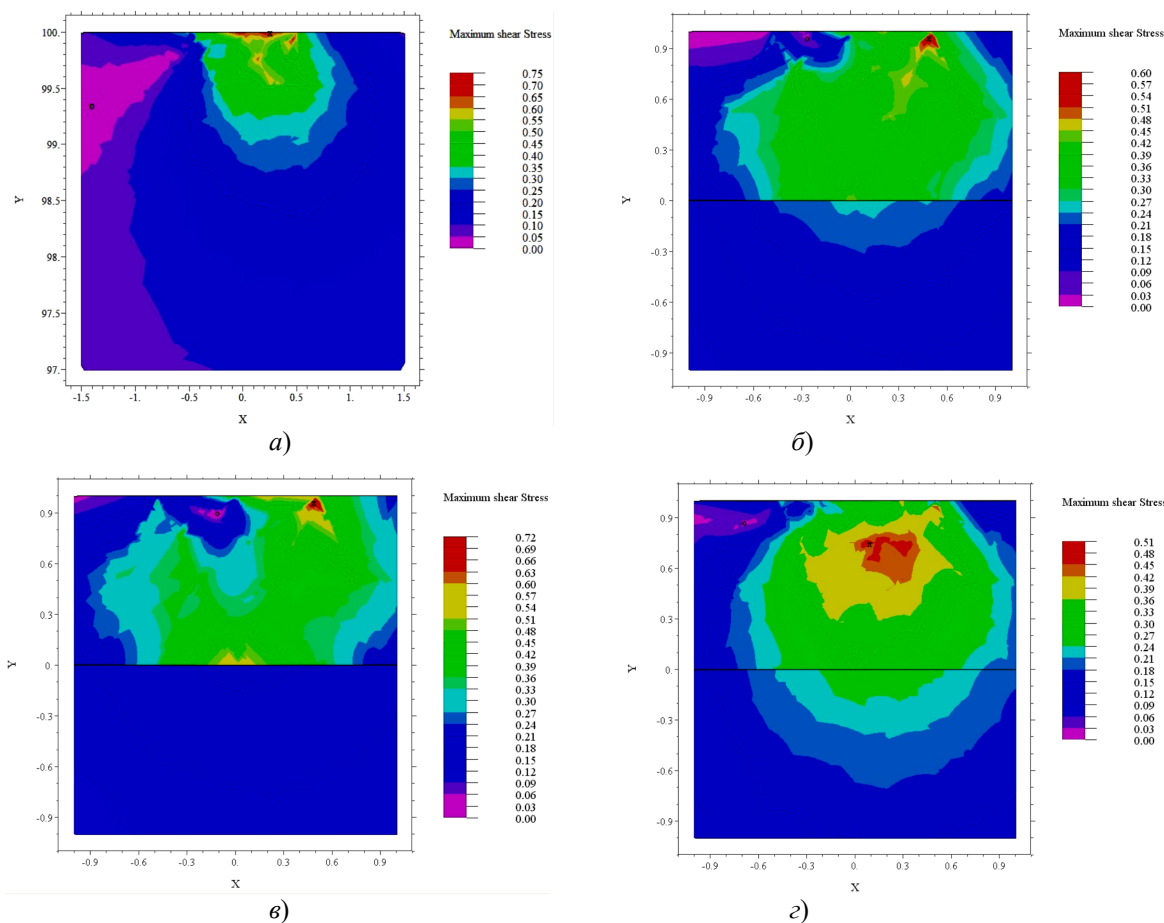


Рисунок 2.2 – Распределение полей максимальных напряжений τ_{\max} . Коэффициент трения индентора по покрытию $f = 0,15$, толщина покрытия $h = 1$ мкм, $a = 0,5$ мкм:

a – без покрытия (модуль упругости $E = 2,0 \cdot 10^{11}$ Па);

b – отношение модуля упругости покрытия к модулю упругости основания $E_{\text{пок}} / E_{\text{осн}} = 2,2$;

$в$ – $E_{\text{пок}} / E_{\text{осн}} = 4,4$; $г$ – $E_{\text{пок}} / E_{\text{осн}} = 13,3$

теле можно найти в [13]). Например, на рисунке 2.2, *a* показаны максимальные напряжения для однородной полуплоскости. На рисунке 2.3 показано перемещение точки (y_m) расположения максимальных сдвиговых напряжений по глубине покрытия. Для относительно толстых покрытий зона максимальных сдвиговых напряжений τ_{\max} может находиться внутри покрытия или смещаться на границу раздела покрытия с основанием, а для более тонких покрытий – располагаться внутри основания. Смещение зоны максимальных напряжений при трении в глубину покрытия, имеющего высокий уровень значений модуля упругости, либо в основание, может привести к формированию в нем значительных сдвиговых напряжений, которые будут способствовать протеканию актов пластической деформации в основании и к появлению растягивающих напряжений в упрочненном слое [1]–[3]. Последнее, в свою очередь, приведет к ускоренному растрескиванию упрочненного слоя при трении.

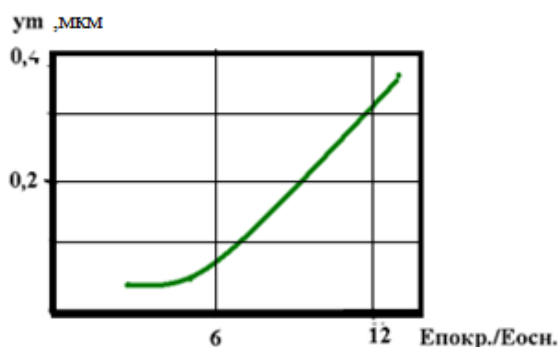


Рисунок 2.3 – Изменение расположения точки y_m максимальных напряжений τ_{\max} по глубине слоя в зависимости от отношения модулей упругости покрытия и основания

Таким образом, можно заключить, что формирование на поверхности материалов упрочненных слоев с более высоким значением модуля упругости по сравнению с модулем упругости основания будет приводить к смещению зоны максимальных напряжений при трении в глубину упрочненного слоя (и в основание), что может способствовать пластификации основания и появлению дополнительных растягивающих напряжений в упрочненном слое, приводящих к его ускоренному разрушению [2], [3].

Заключение

С помощью метода конечных элементов исследовано напряженно-деформированное состояние покрытия и подложки при контакте с цилиндрическим индентором при трении. Установлено, что по мере увеличения отношения модуля упругости покрытия к модулю упругости

основания точка максимальных напряжений смещается в глубину покрытия. При этом может регистрироваться некоторое увеличение износостойкости покрытия, имеющего большую толщину по сравнению с зоной контакта. При уменьшении толщины покрытия различие в модулях упругости покрытия и основания может, напротив, приводить к ускоренному разрушению упрочненного слоя при трении вследствие пластической деформации основы. Разработанные модели будут применяться к исследованию износостойкости материалов с твердыми слоями.

ЛИТЕРАТУРА

1. Белый, А.В. Сдвиговая пластическая деформация и износостойкость ионно-модифицированных материалов с твердыми слоями / А.В. Белый, В.А. Кукареко, В.Е. Рубцов, А.В. Колубаев // Физическая мезомеханика. – 2002. – Т. 5, № 1. – С. 41–47.
2. Износостойкость в условиях трения без смазочного материала ионно-азотированной стали 40X13 / В.А. Кукареко, А.В. Кушнеров, И.Ю. Тарасевич, В.В. Можаровский // Актуальные вопросы машиноведения: Сб. научных трудов / редколлегия С.Н. Поддубко (гл. ред.) [и др.]. – Минск: ОИМ НАН Беларуси, 2021. – Вып. 10. – С. 302–306.
3. Закономерности изнашивания упрочненной ионами азота аустенитной стали 12X18H10T / В.А. Кукареко, В.В. Можаровский, А.В. Кушнеров, С.А. Марьин // Проблемы физики, математики и техники. – 2022. – № 4 (45). – С. 37–43.
4. Chen, J-S. Phase stability, magnetism, elastic properties and hardness of binary iron nitrides from first principles / J-S. Chen, C. Yu, H. Lu // Journal of Alloys and Compounds. – 2014. – Vol. 625. – P. 224–230.
5. Можаровский, В.В. Прикладная механика слоистых тел из композитов / В.В. Можаровский, В.Е. Старжинский. – Минск: Наука, 1988. – 280 с.
6. Можаровский, В.В. Исследование напряженного состояния волокнистого композиционного материала с однородным покрытием при контакте с цилиндрическим индентором / В.В. Можаровский, Н.А. Рогачева // Материалы, технологии, инструменты. – 2000. – № 2. – С. 5–10.
7. Можаровский, В.В. Анализ механико-математических моделей расчета функционально-градиентных материалов, работающих в условиях контактного взаимодействия / В.В. Можаровский, Е.М. Березовская // Материалы, технологии, инструменты. – 2013. – № 3. – С. 14–21.
8. Гупта, П.К. Контактная задача для слоя / П.К. Гупта, Ж.А. Валовит, Е.Ф. Финкин // Проблемы трения и смазки. – 1973. – № 4. – С. 61–67.
9. Modeling and determination of the most stressed state of a closed cylindrical shell made of fragile material under selected heating conditions /

М. Nachkevych, O. Humenchuk, V. Mozharovs'kyi, B. Chornyi // Międzynarodowe seminarium naukowe optymalizacja struktur procesów wytwórczych 21, Opole, grudnia 2021. – Poland 2021. – С. 51.

10. *Применение математических методов к расчету контактного взаимодействия упругих тел из композитов* / В.В. Можаровский, Д.С. Кузьменков, И.И. Коляскин, Ю.В. Василевич, С.В. Киргинцева // Математические методы в технике и технологиях ММТТ-34: Международная научная конференция, Минск, 25 октября 2021 г. / Белорусский национальный технический университет. – Минск, 2021. – С. 10–11.

11. *Применение математических методов к расчету контактного взаимодействия упругих тел из композитов* / В.В. Можаровский, Д.С. Кузьменков, И.И. Коляскин, Ю.В. Василевич, С.В. Киргинцева // Математические методы в технике и технологиях. – 2021. – № 11. – С. 7–10.

12. *Можаровський, В.В.* Реалізація математичних моделей визначення температури для шару на пружному півпросторі / В. Можаровський, В. Кукареко, О. Кушнеров // Сучасні проблеми термомеханіки: сб. Міжнар. наук. конф. 15–17 вересня 2021 р., Львів, Україна. 2021. – С. 129–130.

13. *Джонсон, К.* Механика контактного взаимодействия / К. Джонсон. – Москва: Наука, 1989. – 410 с.

Поступила в редакцію 28.01.2024.

Информация об авторах

Можаровский Валентин Васильевич – д.т.н., профессор

Кукареко Владимир Аркадьевич – д.ф.-м.н., профессор

Марьин Сергей Александрович – к.т.н.

Кушнеров Андрей Викторович – научный сотрудник