

УДК 539.375.5:621.793.74

В.И.КОПЫЛОВ, С.П. СОЛОДКИЙ

Национальный технический университет Украины «КПИ», г. Киев, Украина

И.А.СЕЛИВЕРСТОВ

Херсонский национальный технический университет, г. Херсон, Украина

ДЕМПФИРУЮЩИЕ СВОЙСТВА ПЛАЗМЕННЫХ АЛЮМИНИЙ – НИКЕЛЕВЫХ ПОКРЫТИЙ НА ВЫСОКОЛЕГИРОВАННЫХ СТАЛЯХ

В данной работе проведены исследования затухания инфразвука в стали X18H9T с плазменными покрытиями в широком температурном интервале измерений температур и деформаций. Установлено существенное влияние плазменных покрытий на температурные и амплитудные зависимости внутреннего трения покрытий на основе (NiAl-SiO₂-Al₂O₃) и AlNi-Al₂O₃/Ti. Наличие сложных демпфирующих характеристик обусловлено сложной микроструктурой покрытия, содержащей внутренние границы раздела и поры.

Кроме внутренних демпфирующих механизмов, происходящих в самом покрытии и подложке по отдельности, реализуются дополнительные демпфирующие механизмы на границах раздела отдельных зерен и частиц, а также межфазной границе взаимодействия в системе «покрытие-основа».

Ключевые слова: плазменные покрытия, внутреннее трение, керамический порошок, модуль упругости.

В.І.КОПИЛОВ, С.П. СОЛОДКИЙ

Національний технічний університет України «КПІ», м Київ, Україна

І.А.СЕЛІВЕРСТОВ

Херсонський національний технічний університет, м Херсон, Україна

ДЕМПФУЮЧІ ВЛАСТИВОСТІ ПЛАЗМОВИХ АЛЮМІНІЙ - НІКЕЛЕВИХ ПОКРИТТІВ НА ВИСОКОЛЕГОВАНИХ СТАЛЯХ

У даній роботі проведено дослідження загасання інфразвуку в сталі X18H9T з плазмовими покриттями в широкому температурному інтервалі вимірювань температур і деформацій. Встановлено істотний вплив плазмових покриттів на температурні і амплітудні залежності внутрішнього тертя покриттів на основі (NiAl-SiO₂ • Al₂O₃) і AlNi-Al₂O₃ / Ti. Наявність складних демпфуючих характеристик обумовлено складною микроструктурою покриття, що містить внутрішні межі розділу та пори.

Крім внутрішніх демпфуючих механізмів, що відбуваються в самому покритті і підкладці, окремо реалізуються додаткові демпфуючі механізми на границях меж окремих зерен і частинок, а також міжфазній межі взаємодії в системі «покриття-основа».

Ключові слова: плазмові покриття, внутрішнє тертя, керамічний порошок, модуль пружності.

V.I.KOPYLOV, S.P. SOLODKIY

National Technical University of Ukraine "KPI", Kyiv, Ukraine

I.A.SELIVERSTOV

Kherson National Technical University, Kherson, Ukraine

DAMPING PROPERTIES ALUMINUM - NICKEL PLASMA COATINGS ON HIGH-ALLOY STEELS

In this work, conducted infrasound attenuation study in the steel X18H9T with plasma coatings in a wide temperature range of measurement of temperature and strain, it was found a significant effect of plasma coatings on the temperature and amplitude dependences of internal friction based coatings (NiAl-SiO₂ • Al₂O₃) and AlNi-Al₂O₃ / Ti. The presence of complex damping characteristics due to the complex microstructure of the coating containing the internal interface and pores.

Besides the internal damping mechanisms occurring in the coating and the substrate, additional damping mechanisms occur at the boundaries of the individual grains and particles, and interaction in the interface "coating-base" system.

Keywords: plasma coating, internal friction, ceramic powder, modulus of elasticity.

Постановка проблемы

Для повышения различных физико-механических характеристик, а также надежности конструкционных материалов в условиях воздействия вибрационных нагрузок применительно к соответствующим элементам конструкций используют покрытия, в том числе, полученные плазменным напылением [1-3].

Оценку демпфирующих свойств плазменных покрытий и системы «основа – покрытие» можно проводить по данным измерений коэффициента внутреннего трения (ВТ), являющегося функцией амплитуды деформаций γ и температуры $T - Q^{-1} = f(\gamma, T)$ [4-6].

Анализ последних исследований и публикаций

Влияние плазменных одно- и многокомпонентных покрытий на параметры температурной и амплитудной зависимостей внутреннего трения (ТЗВТ, АЗВТ) апробировано на примере ряда систем, где в качестве основы были выбраны железо и высоколегированные стали [1-3,5-8]. При этом показана возможность повышения демпфирующих свойств матрицы за счет покрытий, как без обработки, так и после термодиффузионной обработки. Метод ВТ позволяет получить информацию о структурных особенностях различных зон влияния в системе «основа-покрытие». Такая информация уже была получена для материалов со сложными композиционными газотермическими покрытиями различной структуры. В настоящее время проанализировано, в какой мере на амплитудные зависимости внутреннего трения и, соответственно, на процессы микропластической деформации образцов может повлиять нанесение на них одно- и многослойных покрытий, параметры их структурных составляющих [1,5,6].

В то же время изменение общего фона затухания энергии упругих колебаний при измерении ВТ, а также наличие известных и появление новых аномалий, как на ТЗВТ, так и на АЗВТ конструкционных материалов с нанесением покрытий вызывает необходимость проведения дополнительных исследований для более глубокого понимания этих явлений.

Формулировка цели исследований

Целью работы является исследование эффективности применения покрытий, полученных плазменным напылением, для повышения демпфирующих свойств конструкционной стали с одновременным упрочняющим эффектом.

Изложение основного материала исследования

Для исследований в качестве основы использовалась сталь аустенитного класса, а в качестве покрытий - порошки из макрочастиц NiAl (диаметр частиц 20...40 мкм), а также смеси композиционного порошка NiAl и ультрадисперсных частиц алюмоаэросила ($\text{SiO}_2 \cdot \text{Al}_2\text{O}_3$) (диаметром порядка 60 нм) – ($\text{NiAl-SiO}_2 \cdot \text{Al}_2\text{O}_3$) и плакированных титаном частиц $\text{Al}_2\text{O}_3/\text{Ti}$ [5,6,9,10].

Амплитудную и температурную зависимости внутреннего трения для оценки демпфирующих свойств измеряли на установке, представляющей собой «обратный крутильный маятник». Исследования поглощения инфразвука проводились на проволочных образцах из стали X18H9T диаметром 1 мм и длиной 100 мм. [1,5,6].

Покрытия наносились на поверхность образцов плазменным напылением на установке УПУ-3Д, оснащенной плазмотроном с ламинарным истечением плазменного потока.

В качестве материалов покрытий используются порошки различного состава - металлические, керамические, квазикристаллические, в том числе ультрадисперсные и с наносоставляющими [1,5,6,9,10]. Выбирая тип частиц порошка, варьируя их морфологию, размеры, плотность и способ введения в конечный продукт, можно получать защитные покрытия многофункционального назначения. Наличие в составе исходной порошковой массы сложных наноразмерных составляющих приводит к образованию в покрытии в процессе напыления структур различного фазового и химического состава, охватывающие различные зоны по сечению композиции [1,5].

При исследовании амплитудной и температурной зависимости внутреннего трения высоколегированных аустенитных сталей на кривых ТЗВТ можно получить несколько аномалий - эффектов в зависимости от состава материала и его структурного состояния, как в низкотемпературной, так и в высокотемпературной области спектра [11-14]. Применение покрытий на сложнолегированных сталях различного класса определяется эксплуатационными условиями, поэтому при исследовании влияния покрытий на такие объекты указанные эффекты могут служить особо чувствительными реперами, по которым и можно судить о демпфирующих свойствах покрытий и композиции в целом.

На рис.1 представлены температурные зависимости внутреннего трения цилиндрических (проволочных) образцов из стали X18H9T. В результате измерений ВТ на образцах без покрытий (рис.1, кр.1) зафиксированы эффекты, физическая природа которых известна - при нагревании возникает спектр поглощения упругой энергии с пиками в районе температур 100 - 150, 320-390, 600 и 730 - 750°C [11-14].

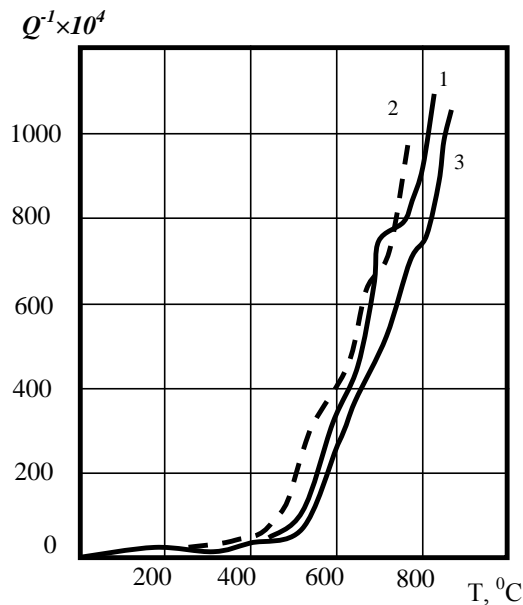


Рис.1. Температурная зависимость внутреннего трения образцов стали X18N10T в состоянии поставки (деформированном состоянии): 1- без покрытия; 2 – с плазменным покрытием на основе $(NiAl-SiO_2 \cdot Al_2O_3)$; 3- с покрытием и последующим диффузионным отжигом.

На кривых ТЗВТ - $Q^{-1} = f(T)$ выявляются деформационные пики при температурах (23...127°C) – деформационные пики Хасигути, а в области температур (320...410°C) - пики Финкельштейна — Розина (ФР), механизм которых связан с миграцией атомов внедрения в поле напряжений. Известно, что пик ФР в ряде моментов сопровождается возникновением одного или двух дополнительных пиков, располагающихся по обе стороны от основного. В нашем случае при малой частоте колебаний 1 Гц температуры проявления этих пиков ниже по сравнению с известными. Эти эффекты в увеличенном масштабе представлены на рис.2.

Пик в районе температур (600...700°C) связан с зернограничной релаксацией. Он может, как считают некоторые исследователи, вообще совпасть с фазовым пиком при 730°C [11]. В нашем случае видно, что зернограничный пик (ЗГП), обособляется и несколько сдвинут в сторону больших температур ($T_{max} \sim 717^\circ C$).

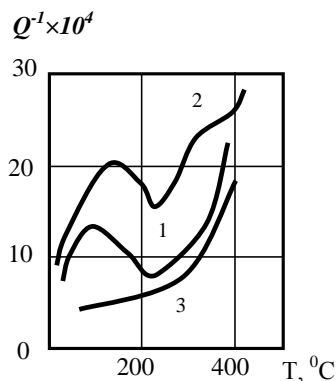


Рис.2. Результаты аналогичные (рис.1) в увеличенном масштабе для диапазона температур $T = 20...400^\circ C$.

Нанесение плазменного покрытия на основе $(NiAl-SiO_2 \cdot Al_2O_3)$, как следует из рис.1, кр.2 и рис.2, кр.2, приводит к изменению вида и уровня ТЗВТ рассматриваемой композиции. Для образцов из стали X18N9T без предварительной термообработки в спектре затухания упругой энергии при напылении имеют место деформационный пик при 100-150°C и пики ФР, аналогично образцам без покрытия (рис.1 и рис.2). Также наблюдается уширенный ЗГП, содержащий несколько компонент.

При наличии диффузионного слоя, полученного после отжига образцов с нанесенным покрытием при температуре 1100°C в течение 2 час, как свидетельствует кривая 3 на рис.1 и рис.2, зернограничное проскальзывание (ЗГП) подавляется, и ЗГП меняет свою форму, изменяется и по ширине и по величине.

Предварительная термообработка исходных образцов существенно сказывается на параметрах ВТ. На рис.3 приведены данные измерений ВТ на образцах из стали X18N9T, прошедших предварительную термодиффузионную обработку при 1100°C в течение 2 час. (кр.1, образцы без

покрытия). Как следует из результатов измерений, нанесение плазменного покрытия на отожженную матрицу (кр.2 на рис.3) меняет спектр поглощения упругой энергии. По сравнению с результатами для образцов в состоянии поставки (после протяжки через фильеры, рис.1, 2), как видно на рис.3, общий уровень ВТ понижается, практически исчезают пики, обусловленные деформацией матрицы при 100...150°C, и пики ФР.

Изменились и высокотемпературные пики при 600°C и 720°C. Внутреннее трение в образцах после отжига в области проявления зернограничной релаксации (ЗГП) имеет значение существенно меньшее, чем в случае образцов без предварительного отжига и с последующим нанесением покрытия на основе (NiAl-SiO₂·Al₂O₃).

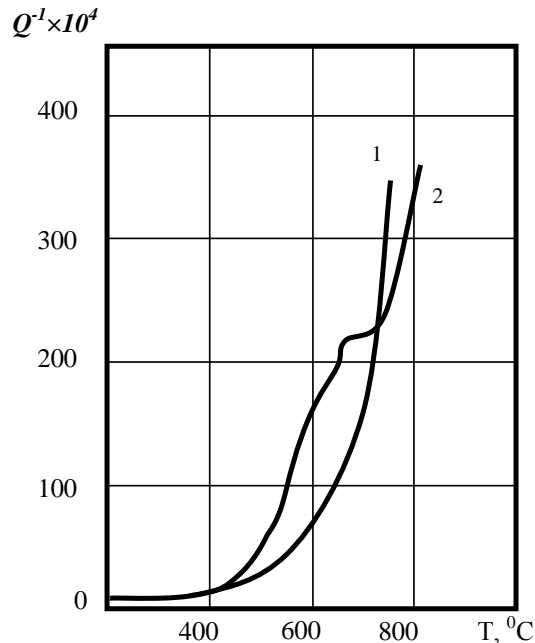


Рис.3. Температурная зависимость внутреннего трения в образцах из стали X18H9T после диффузионного отжига при 1100°C, 2 час.: 1 – без покрытия; 2 – с плазменным покрытием на основе (NiAl-SiO₂·Al₂O₃).

Аналогично результатам ТЗВТ, аномальное поведение затухания энергии упругих колебаний наблюдается при исследованиях амплитудной зависимости внутреннего трения – АЗВТ. Данные по АЗВТ для образцов из стали X18H9T с плазменным покрытием на основе (NiAl-SiO₂·Al₂O₃) представлены на рис.4.

Во всех случаях отмечается смещение предельной критической деформации $\gamma_{кр}$ в область с существенно меньшими значениями деформаций $\gamma_{кр}$. Фон ВТ (Q_{ϕ}^{-1}) для образцов с покрытиями, как для области малых, так и для области больших деформаций γ , выше значений (Q_{ϕ}^{-1}) по сравнению с образцами без покрытий. Нанесение покрытия влияет на торможение подвижных дислокаций, как в основе, так и в покрытии, и обуславливает возникновение второй критической деформации $\gamma_{кр}''$, что связано уже с отрывом дислокаций от точек закрепления именно в покрытии.

Согласно экспериментальным результатам (рис.4) у образцов с покрытиями (кр.2, кр.3) общая плотность незакрепленных дислокаций, как в основе, так и в слоях сложного покрытия существенно выше, чем у образцов без покрытий. Свидетельством такому утверждению является увеличение наклона кривых АЗВТ ($tg\alpha - \Delta Q^{-1} / \Delta\gamma$), что характеризует энергию, рассеиваемую при движении дислокаций в зоне микропластической деформации материала [1,4,5].

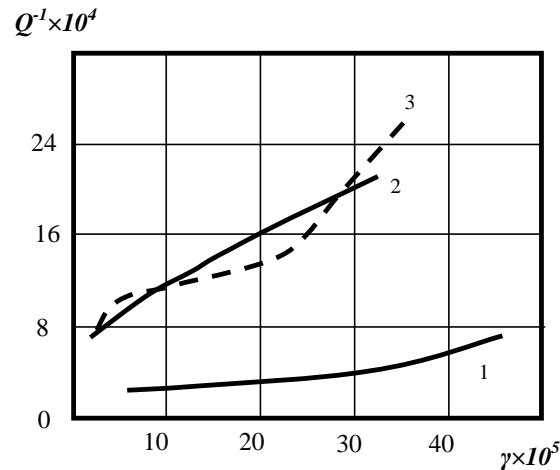


Рис.4. Амплітудна залежність внутрішнього тріння образців сталі Х18Н10Т в стані поставки (деформованому стані): 1- без покриття; 2 – с плазменним покриттям на основі ($NiAl-SiO_2-Al_2O_3$); 3- с покриттям і наступним дифузійним отжигом.

В качестве общего анализа можно отметить следующее. Из результатов измерений АЗВТ, как и ТЗВТ, следует, что нанесение плазменного покрытия, в частности композиционного покрытия ($NiAl-SiO_2-Al_2O_3$) приводит к возрастанию затухания энергии механических колебаний. При амплитудах напряжений, выше критической $\gamma''_{кр}$, подвижность дислокаций велика, в результате чего возникает локальная деформация внутри отдельных зерен и декремент колебаний растет. Однако, при дальнейшем повышении уровня напряжений свободные дислокации встречают препятствия в виде границ зерен, наблюдается их скопление, уменьшается подвижность вследствие образования поля напряжений, декремент колебаний уменьшается, на АЗВТ возможно формирование максимума, как следует из результатов ряда работ, например [9]. Роль границ блоков и зерен в образовании максимума затухания на амплитудной зависимости возможна при условии, что внутризеренная структура обладает максимальной пластичностью, а границы зерен упрочнены.

Все перечисленное позволяет утверждать, что при измерении ВТ присутствие покрытия на поверхности образцов приводит к появлению квазисвободных дислокаций, к образованию нестабильного состояния, изменению напряженного состояния в различных локальных зонах композитной системы, и, соответственно, повышению уровня демпфирования композитов.

В общем случае увеличение или уменьшение уровня (фона) затухания энергии (или высоты пика) при наличии конкретного покрытия с соответствующим модулем упругости характеризуется соотношением противоположных факторов влияния, а именно, между возрастанием плотности дислокаций, и, в противоположность этому, степенью их закрепления. Нестабильность, пористость сложных структур плазменных покрытий могут влиять на механические характеристики покрытых образцов, а также на такую основную физическую характеристику материала, как модуль упругости. Сформированные сложные структуры покрытий могут быть источником высоких демпфирующих способностей при приложении вибрационных нагрузок.

Таким образом, увеличение уровня затухания энергии упругих колебаний, а также увеличение высоты ЗПП и появление новых пиков – эффектов является следствием возрастания плотности (количества) подвижных дислокаций при наличии конкретного плазменного покрытия. В тоже время, наличие покрытия приводит к проявлению упрочняющего эффекта за счет закрепления подвижных дислокаций, что сопровождается уменьшением общего уровня затухания энергии, уменьшением или полным подавлением высоты пиков, увеличением критической деформации $\gamma_{кр}$ [1,5].

Исходя из соображений о противоположном характере влияния таких факторов, как аномальное повышение уровня ВТ, с одной стороны, и повышение модуля упругости за счет закрепления подвижных структурных элементов, с другой стороны, а также руководствуясь данными литературных источников [8,15], для оценки воздействия покрытий на основной металл, можно предложить критерий демпфирования. Значения критерия демпфирования для соответствующих величин модулей упругости ряда плазменных покрытий представлены в таблице в виде произведения модуля упругости на коэффициент внутреннего трения при конкретной деформации, а именно:

$$D_{оemn} = E_n Q_n^{-1}. \quad (1)$$

Модуль упругости покрытий получен на основании измерений ВТ системы «основа – покрытие», обработки данных и выделения спектра конкретно покрытия, согласно методике, изложенной в работе [9].

Значения модулей упругости и критерия демпфирования для ряда плазменных покрытий, определенных по расчетно-экспериментальной методике для соответствующих значений деформаций и коэффициента затухания Q^{-1} образцов с покрытиями и без него при комнатной температуре представлены в таблице 1. В таблице также для общего анализа приведены, помимо рассмотренных покрытий, также и данные для некоторых других важных, точки зрения демпфирования, покрытий.

В случае цилиндрических (проволочных) образцов происходят явления поглощения упругой энергии в небольшом поверхностном слое, толщиной не более 0,2 мм. За протекание этих процессов ответственными являются структура и состав, прежде всего поверхностных, достаточно тонких слоев образца, включая само покрытие, а также межфазную граничную зону между покрытием и матрицей.

Таблица 1

Значения критерия демпфирования плазменных покрытий

Покрытие	Модуль упругости покрытия E_n , ГПа	Коэффициент Пуассона, ν	Коэффициент демпфирования $D_{демп} = E_n Q_n^{-1}$, ГПа
AlNi	105	0,28	0,22
NiAl–(SiO ₂ ·Al ₂ O ₃) (алюмоаэросил)	157	0,27	0,345
AlNi–Al ₂ O ₃ /Ti	88	0,25	1,02
NiCr+(SiO ₂ ·Al ₂ O ₃) (двухслойное)	194	0,22	0,772
Mo	89	0,23	0,134

При плазменном напылении, формирование самого покрытия и контактной межфазной зоны сопровождается насыщением их большим числом точечных и линейных дефектов. Покрытия, сформированные из деформированных частиц порошка, содержат большое количество, как внутриверенных, так и межверенных границ. Для плазменных покрытий, эти границы раздела включают макрограницу между покрытием и основой, границы раздела между ламелями в слое покрытия, границы зерен, для них характерно наличие пор и других микродефектов. В этом случае поле деформаций в прилегающей к границе раздела области, а также релаксационные эффекты под действием вибрационных нагрузок, будут улучшать демпфирующие способности структуры.

Увеличение способности материалов к рассеиванию запасенной упругой энергии после нанесения на их поверхность плазменных покрытий происходит, в большей степени, для материалов с теми покрытиями, структура которых имеет большую протяженность межфазных границ. Это показано на примере многокомпонентных покрытий, содержащих наносоставляющие в виде нанопорошков или лакированных порошков. Исходя из таких подходов, как видно из таблицы, в нашем рассматриваемом случае, наибольшими демпфирующими свойствами обладает комплексное покрытие на основе лакированных порошков и смесей с наносоставляющими.

Выводы

Проведены исследования затухания инфразвука в стали X18H9T с плазменными покрытиями в широком температурном интервале измерений температур и деформаций.

Установлено существенное влияние плазменных покрытий на ТЗВТ и АЗВТ, в частности покрытий на основе (NiAl–SiO₂·Al₂O₃) и AlNi–Al₂O₃/Ti.

Сложная микроструктура покрытия, содержащая внутренние границы раздела и поры, приводит к сложным демпфирующим характеристикам.

Кроме внутренних демпфирующих механизмов, происходящих в самом покрытии и подложке по отдельности, реализуются дополнительные демпфирующие механизмы на границах раздела отдельных зерен и частиц, а также межфазной границе взаимодействия в системе «покрытие-основа».

В качестве количественного показателя эффективности демпфирования композитного материала предложен критерий в виде $D_{демп} = E_n Q_n^{-1}$.

Список использованной литературы

1. Копылов В. И. Влияние состава и микроструктуры керамических оксидных покрытий на физико-механические свойства композиционных материалов / В. И. Копылов, И. В. Смирнов, С. В. Рыбаков // Проблемы техники. — 2005. — №2. — С. 37-43.
2. Потехин Б. А. Влияние плазменных покрытий на демпфирующие свойства конструкционных

- сталей / Б. А. Потехин, С. Г. Лукашенко, С. П. Кочугов // *Металловедение и термическая обработка металлов.* - 2000.- № 10.-С. 30 – 33.
3. Лукашенко С.Г. Закономерности формирования демпфирующих свойств плазменных покрытий, нанесенных на конструкционные стали. Автореферат диссертации на соискание ученой степени кандидата технических наук.- Екатеринбург.- 2000 г.-20 с.
 4. Головин С. А. Упругие и демпфирующие свойства конструкционных металлических материалов / С. А. Головин, А. Пушкар, Д. М. Левин // М.: *Металлургия,*- 1987.- 193 с.
 5. Копылов В.И. Основные особенности формирования многокомпонентных газотермических покрытий, обуславливающие физико–механические свойства композиций при напылении /В.И.Копылов, И.А.Варвус, Б.Г.Стронгин [и др.]// *ФХММ.*– 1991.– №1.– С. 65–70.
 6. Копылов В. И. Влияние плазменных покрытий из порошков с наноразмерными составляющими на внутреннее трение железа / В. И. Копылов, С. Л. Рево, И. В. Смирнов, Е. А. Иваненко, Ф. В. Лозовый, Д. А. Антоненко // *Наносистемы, наноматериалы, нанотехнології. Збірник наукових праць.* — 2010. — том.8.— Выпуск 1. — С.209-215.
 7. Гадалов В. Н. Исследование амплитудной зависимости внутреннего трения плазменных покрытий // В. Н. Гадалов, О. Б. Чевела.- *Порошковая металлургия.*- 1980.- № 2.- 30-32 с.
 8. Liming Yu. Damping efficiency of the coating structure/ Yu Liming, Ma Yue, Zhou Chungen, Xu Huibin// *International Journal of Solids and Structures.* – 2005. – № 42. – P. 3045 – 3058.
 9. Копылов В. И. Физико-механические характеристики и внутреннее трение материалов с многофазными плазменными покрытиями / В. И. Копылов, Д. А. Антоненко // *Проблемы техники.*- 2014.- № 2.- С. 72-89.
 10. Копылов В.И. Процеси іонно–плазмового плакування порошків для газо–термічних покриттів / В.И. Копылов, І.В. Смирнов, І.А. Селіверстов // *Наукові вісті Національного технічного університету України «Київський політехнічний інститут».*– 2009.–№3 (65).–С.11–20.
 11. Стронгин Б. Г. Температурная зависимость внутреннего трения аустенитной стали X18H22B2T2 / Б. Г. Стронгин, И. Ю. Третьяк, И. А. Варвус, Г. Г. Максимович // *Кн. Физика твердого тела.* Киев – Донецк.- 1978.- № 8.- С. 38-43.
 12. Паршин А.М. Структура, прочность и пластичность нержавеющей и жаропрочных сталей и сплавов, применяемых в судостроении .- Л.: *Судостроение.*- 1972.- 288 с.
 13. Вернер В. Д. Структура пика Финкельштейна – Розина в деформированных аустенитных сталях / В. Д. Вернер, Л. В. Кобликова, В. К. Коробов // *Кн. Механизмы внутреннего трения в полупроводниковых и металлических материалах.*- М.: *Наука,*- 1972.- С. 152 – 154.
 14. Вернер В. Д. Особенности амплитудной зависимости внутреннего трения аустенитных сталей / В. Д. Вернер, Л. В. Кобликова, В. К. Коробов // *Кн. Механизмы внутреннего трения в полупроводниковых и металлических материалах.*- М.: *Наука,*- 1972.- С. 156 - 160
 15. Фавстов Ю. К. К определению внутреннего трения демпфирующих покрытий // *Изв. АН СССР, ОТН, Механика и машиностроение.* – 1963. – № 3. – С.127 – 128.