

УДК 539.375.5:621.793.74

В.І. КОПЫЛОВ, С.П. СОЛОДКИЙ

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

І.А. СЕЛИВЕРСТОВ

Херсонский национальный технический университет, г. Херсон, Украина

ЭФФЕКТИВНОСТЬ ПЛАЗМЕННЫХ МОЛИБДЕНОВЫХ ПОКРЫТИЙ НА КОНСТРУКЦИОННЫХ МАТЕРИАЛАХ В УСЛОВИЯХ ВОЗДЕЙСТВИЯ НАГРУЗОК И ТЕМПЕРАТУР

Проведены исследования температурной и амплитудной зависимости внутреннего трения системы Fe – Mo в широком диапазоне температур и деформаций, получены параметры, характеризующие механизмы рассеяния энергии упругих колебаний. Показано существенное повышение общего уровня внутреннего трения при нанесении плазменного молибденового покрытия.

На кривых ТЗВТ в высокотемпературной и низкотемпературной областях наблюдается формирование широких пиков – эффектов, являющихся следствием суперпозиции различных релаксационных явлений в поверхностных слоях основы, на межфазной границе и в самом молибденовом покрытии.

При исследованиях АЗВТ установлено, что наличие Mo покрытия приводит к существенному уменьшению критической амплитуды $\gamma_{кр}''$, что свидетельствует о более раннем начале микропластической деформации, и наоборот, увеличение $\gamma_{кр}''$ при повышении температуры отжига свидетельствует об упрочняющем эффекте.

Подтверждено, что действие различных механизмов внутреннего трения, обусловленных неоднородностью существующих по сечению образца напряжений и деформаций, коррелирует с процессами, определяющими параметры интенсивности высвобождаемой энергии G_c и коэффициентов интенсивности напряжений K_c при отслоении или растрескивании покрытий в системе «основа – покрытие».

Ключевые слова: плазменное напыление, молибденовое покрытие, внутреннее трение, трещиностойкость, прочность, когезия, адгезия.

В.І. КОПИЛОВ, С.П. СОЛОДКИЙ

Національний технічний університет України
«КПІ імені Ігоря Сікорського», м Київ, Україна

І.А. СЕЛІВЕРСТОВ

Херсонський національний технічний університет, м Херсон, Україна

ЕФЕКТИВНІСТЬ ПЛАЗМОВИХ МОЛІБДЕНОВИХ ПОКРИТТІВ НА КОНСТРУКЦІЙНИХ МАТЕРІАЛАХ В УМОВАХ ДІЇ НАВАНТАЖЕНЬ І ТЕМПЕРАТУР

Проведені дослідження температурної і амплітудної залежності внутрішнього тертя системи Fe – Mo в широкому діапазоні температур і деформації, отримані параметри, що характеризують механізми розсіяння енергії пружних коливань. Показано істотне підвищення загального рівня внутрішнього тертя при нанесенні плазмового молибденового покриття.

На кривих ТЗВТ у високотемпературній і низькотемпературній областях спостерігається формування широких піків – ефектів, що є наслідком суперпозиції різних релаксаційних явищ в поверхневих шарах основи, на між фазній границі і в самому молибденовому покритті.

При дослідженнях АЗВТ встановлено, що наявність Mo покриття приводить до істотного зменшення критичної амплітуди, що свідчить про більш ранній початок мікропластичної деформації, і навпаки, збільшення $\gamma_{кр}''$ при підвищенні температури відпалу свідчить про зміцнюючий ефект.

Підтверджено, що дія різних механізмів внутрішнього тертя, обумовленої неоднорідністю напружень і деформації, які існують по перетину зразка, корелює з процесами, що визначають параметри інтенсивності вивільненої енергії G_c і коефіцієнтів інтенсивності напруження K_c при відшаруванні або розтріскуванні покриттів в системі «основа – покриття».

Ключові слова: плазмове напылення, молибденове покриття, внутрішнє тертя, трещиностойкість, міцність, когезія, адгезія.

V.I. KOPYLOV, S.P. SOLODKY

National technical university of Ukraine

"KPI of Igor Sikorsky", Kiev, Ukraine

I.A. SELIVERSTOV

Kherson national technical university, Kherson, Ukraine

EFFICIENCY OF PLASMA MOLIBDENIC COATING ON CONSTRUCTIONAL MATERIALS IN THE CONDITIONS OF INFLUENCE OF LOADINGS AND TEMPERATURES

Researches of temperature and amplitude dependence of internal friction of the Fe system – Mo in a broad range of temperatures and deformations are conducted, the parameters characterizing mechanisms of dispersion of energy of elastic oscillations are received. Essential increase in the overall level of internal friction when plotting a plasma molibdenic coating is shown.

On curve TZVT in high-temperature and low-temperature areas formation of wide peaks – the effects which are a consequence of superposition of different relaxational phenomena in basis blankets on interphasic boundary and in the most molibdenic coating is watched.

In case of researches AZVT it is set that Mo's presence leads coating to essential reduction of critical amplitude that testifies to earlier start of microplastic deformation and vice versa, increase in case of temperature increase of annealing demonstrates the hardening effect.

It is confirmed that operation of different mechanisms of internal friction caused by non-uniformity of tension and deformations existing on the section of a sample correlates with the processes determining parameters of intensity of the released energy of Gc and coefficients of intensity of tension of Ks when peeling or cracking coating in the "basis-a coating" system.

Keywords: plasma evaporation, molibdenic coating, internal friction, crack resistance, durability, cohesion, adhesion.

Постановка проблемы

Высокая эффективность плазменного напыления для защиты поверхности деталей и изделий при воздействии внешних факторов (нагрузок, температурных полей, сред) в значительной степени снижается в виду особенностей структуры полученных покрытий [1].

Структура плазменного покрытия, сформированного из расплюснутых частиц – кристаллитов дискообразной формы (сплэтов) со специфической слоистой структурой оказывают решающее влияние на свойства системы «основа – покрытие». Такое покрытие характеризуется, прежде всего, мезо- и дислокационной структурой покрытия, с конкретной пористостью, когезионной и адгезионной прочностью. Наличие точечных и линейных дефектов, а также различных типов трещин – вертикальных, горизонтальных, идущих по телу зерна – частицы, по границе между расплюснутыми частицами или по границе между покрытием и основой, существенно усложняют анализ исследований процессов деформации и разрушения, как самих покрытий, так и композиционной системы в целом при статических, динамических нагрузках, а также в условиях фреттинга или фреттинг – коррозии [2, 3].

Для работы изделий в условиях знакопеременных напряжений и высоких температур используются плазменные покрытия на основе тугоплавких металлов и сплавов, в частности молибденовые покрытия, обладающие также хорошими поглотителями внешних вибраций, способными также противостоять износу и коррозии в агрессивных средах.

Вопросы, связанные с влиянием структуры плазменных покрытий, в частности на основе молибдена, на комплекс эксплуатационных свойств композиционных материалов, являются современными и актуальными.

Анализ последних исследований и публикаций

К наиболее распространенным дефектам при плазменном напылении относятся микроповреждения, появляющиеся в условиях, когда на покрытие действуют температурные поля и статические, а также амплитудно-нагрузочные факторы [4, 5].

При действии таких факторов, особенно, динамических нагрузок по объему материала деталей и механизмов распространяются волны деформаций – напряжений. В частности, в условиях трения зона контакта испытывает импульсные (вибрационные) нагрузки, в результате чего в поверхностных слоях распространяются такие затухающие волны деформаций. При этом подводимая при внешнем трении механическая энергия передается в материал покрытия посредством волн, которые вызывают явления в виде внутреннего трения (ВТ), характеризующие способность твердого тела необратимо рассеивать энергию механических колебаний, превращая ее в теплоту [6, 7].

Молибден, как объект исследований, будучи прочным тугоплавким металлом (высокая энергия межатомной связи, $E = 32 \cdot 10^4$ МПа), в то же время, после пластической деформации характеризуется высокой микропластичностью. Микротрещины, поры и другие дефекты, обуславливающие структурные особенности плазменного покрытия, являются концентраторами напряжений, способствующими

зарождению и распространению трещин по телу композиционного материала [4]. Именно особенности и параметры микроструктуры и субструктуры молибдена (молибденового покрытия) оказывают влияние на распределение напряжений, энергетические потери при перемещении дислокаций, на микромеханизмы и на вязкость разрушения (трещиностойкость), а, в конечном счете, на физико-механические характеристики композиционных материалов [4, 7 – 9].

Молибден в отличие от ферромагнитных металлов и сплавов, характеризуется тем, что он является парамагнетиком, поэтому на его амплитудной зависимости внутреннего трения отсутствует вклад в общие потери магнитоупругого гистерезиса как релаксационного фактора. Высокая пластичность молибдена отражается на повышении уровня амплитудозависимой области внутреннего трения. Невысокая энергия связи атомов примесей с дислокациями, низкое пороговое напряжение старта работы дислокационных источников приводит к быстрому размножению легкоподвижных дислокаций при действии циклических нагрузок. Молибден проявляет высокую дислокационную релаксационную способность в широком диапазоне амплитуд скольжения при фреттинге [5].

Существуют различные виды затухания энергии упругих колебаний, вызванные, прежде всего, дислокациями. По затуханию упругих колебаний в кристаллах можно судить о движении и взаимодействии дислокаций с другими несовершенствами.

Исследования ВТ в жаропрочных материалах в широком диапазоне температур и напряжений представляет интерес, во-первых, с целью получения расчетных значений параметров рассеяния энергии, применительно к конкретным условиям эксплуатации, а, во-вторых, с точки зрения рассмотрения взаимосвязи термомеханического воздействия с микроструктурой и свойствами системы «основа – покрытие».

Таким образом, результатам исследований различных механических характеристик можно поставить в соответствие результаты исследований температурной и амплитудной зависимости внутреннего трения (ТЗВТ, АЗВТ) материалов с покрытиями.

Формулировка цели исследований

Целью работы является анализ влияния микроструктуры плазменных молибденовых покрытий на физико-механические свойства и параметры их внутреннего трения с учетом воздействия температурных полей и деформаций.

Изложение основного материала исследований

Рассмотрены параметры АЗВТ и ТЗВТ, характеризующие механизмы рассеяния механической энергии (релаксации напряжений). Важным фактором снижения напряженности при динамическом нагружении, в том числе в условиях крутильных колебаний, вибраций, при фреттинге твердых тел является действие благоприятных релаксационных, гистерезисных и микропластических механизмов внутреннего трения, определяющих характер амплитудной и температурной зависимостей внутреннего трения и вызывающих формирование соответствующих пиков затухания [10, 11]. Оценка свойств композиционных материалов сводится к анализу изменения общего фона ВТ и высоты зернограничного пика (ЗГП). На рис. 1 показана температурная зависимость внутреннего трения системы Fe-Mo. Для образцов без покрытий (кривая 1) в области $T \approx 500^\circ\text{C}$ характерно сильное поглощение энергии, которое, как известно, объясняется эффектом зернограничного скольжения, и наличие пика связано из поликристаллической природой твердых тел. При нанесении плазменного молибденового покрытия наблюдается существенное повышение общего уровня внутреннего трения (кривая 2), а также дифференциация основного ЗГП на два, и более пиков – эффектов, охватывающих широкую область температур $450\dots 650^\circ\text{C}$ [11].

Наличие инородных атомов в виде покрытия на поверхности основы изменяет динамику дислокаций на межфазной границе раздела. В этом случае создаются благоприятные условия для срабатывания новых источников дислокаций из-за повышенной концентрации напряжений. В конечном счете, затухание энергии при измерении ТЗВТ железа с плазменным молибденовым покрытием можно связать с увеличением плотности подвижных дислокаций (винтовых), которые зарождаются в поверхностных слоях основного материала.

Возможными причинами возникновения высокотемпературного пика ($T=600^\circ\text{C}$) является релаксация напряжений и процесс сдвигообразования на границе покрытие-основа. Напряжения сдвига в определенных случаях могут релаксировать, поскольку межфазная граница имеет определенную вязкость. Матрица (железо) испытывает лишь механические напряжения со стороны слоя. При этом отмеченные напряжения могут достигать больших значений в зависимости от разницы параметров кристаллических решеток матрицы и покрытия. Очевидно, релаксация именно этих напряжений на границе слой-матрица и приводит к появлению второго высокотемпературного пика, величина которого, его форма и сдвиг по шкале температур изменяются в зависимости от термообработки.

Изменением термических условий в зоне контакта покрытия с основой путем диффузионного отжига (кривые 3 и 4, рис. 1) можно достичь изменения в притоке элементов, которые диффундируют, из

покрытия в поверхностные слои основы. Диффузия атомов будет происходить, как по границе зерен, так и по телу зерна, при этом изменяется дислокационная структура.

В общем случае при изменении ВТ напряженное состояние по сечению образца неравномерно и достигает больших значений в его приповерхностных слоях, где скальвающие напряжения при кручении максимальны. Вклад в поглощение энергии слоев, прилегающих к поверхности, может оказаться преобладающим по сравнению со всем объемом материала.

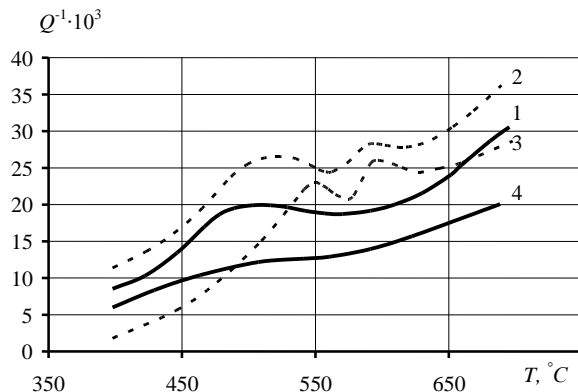


Рис. 1. Температурные зависимости внутреннего трения образцов железа (1) и с Мо покрытием: 2 - после напыления; 3,4 - после напыления и отжига в течение 2 ч. при 1023 К, 1373 К, соответственно

Дополнительная информация о роли поверхностных слоев получена при исследовании влияния толщины покрытия на ТЗВТ. На рис. 2 представлен высокотемпературный спектр ВТ в области зернограничной релаксации. Данные описывают зависимость ТЗВТ в зависимости от толщины молибденового плазменного покрытия в диапазоне толщин от 10 до 60 мкм, напыленного в динамическом вакууме. Структура покрытия, полученного напылением в динамическом вакууме, существенно отличается от структуры покрытия, полученного в режиме обычного напыления (рис. 3). Технология получения плазменного покрытия предполагает образование в нем дефектов, в том числе дислокаций, микротрещин, пор (рис.3, а). Покрытие в динамическом вакууме характеризуется большей сплошностью, большей когезионной прочностью, меньшей пористостью, большей прочностью сцепления с основой (рис. 3, б).

На рис. 4 приведены результаты исследований поглощения энергии упругих колебаний в области низких температур ($\approx 120 \dots 373$ К) для железа с Мо покрытием. В спектре наблюдаются эффекты в виде, так называемой β – релаксации. На рис. 4 представлены данные после выделения фона из общего релаксационного спектра ВТ [11].

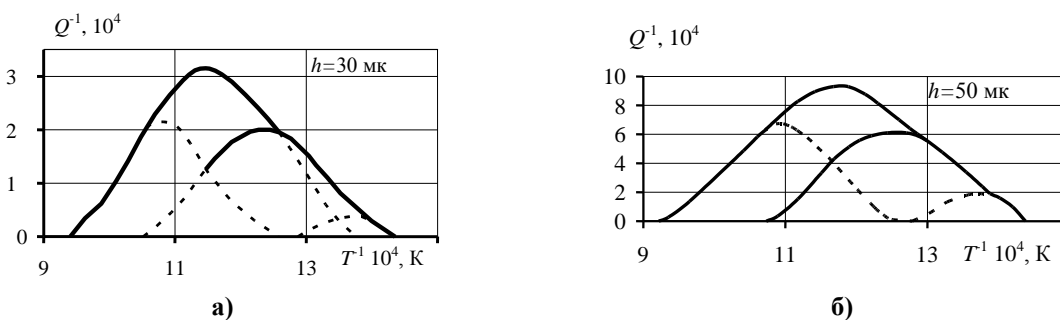


Рис. 2. Высокотемпературный спектр ВТ (область зернограничной релаксации,) железа с Мо покрытием, напыленным в динамическом вакууме, в зависимости от толщины слоя: а – 30 мкм; б – 50 мкм



Рис. 3. Микроструктура плазменного молибденового покрытия после обычного напыления (а) и после напыления в динамическом вакууме (б)

В случае зернограничной релаксации (зернограничный пик ЗГП) и β – релаксации рядом с основным пиком появляются дополнительные – спутники основного. Так, на высокотемпературном спектре ВТ, помимо основного ЗГП имеются примесный зернограничный пик (ПЗГП) и два дополнительных – ДП1 и ДП2. В случае низкотемпературного ВТ наблюдается дифференциация β – релаксации на эффекты – β_1 , β_2 , β_3 . Каждый из вышеуказанных эффектов в области высоких и низких диапазонах температур имеет свою природу и относится к соответствующей области по сечению композиции – к поверхностным слоям основного материала, покрытию или же к межфазной зоне. Эти вопросы подробно освещены в ранних работах, в которых рассмотрен широкий спектр многофазных покрытий [10, 11].

По всей видимости, влияние толщина покрытия проявляется до какой-то определенной максимальной толщины покрытия. На эффекты в приповерхностных слоях матрицы налагаются эффекты в самом покрытии и эффекты в других зонах образца. Толщина покрытия, как уже было отмечено, в основном отражаются на общем фоне ВТ, что обусловлено ростом общего числа дефектов, в том числе и дислокаций. В то же время для проявления более тонких эффектов, ответственных за процессы непосредственно в межфазной зоне, приповерхностных слоях матрицы, а также и глубинных достаточно уже иметь слой небольшой ширины, даже не сплошной, а в виде отдельных дисперсных включений. При этом картина релаксационного спектра, природа эффектов, отображенная на нем, не зависят от толщины покрытий, а зависят только от свойств и состояния его самого и матрицы.

К аналогичным выводам приводят исследования амплитудной зависимости внутреннего трения (АЗВТ), позволяющие определить критическую амплитуду напряжений $\gamma_{кр}''$, которая является критерием микропластичности [7, 10]. Согласно данным АЗВТ (рис.5) в силу изменения энергетического состояния зоны контакта наблюдается заметный рост критической деформации $\gamma_{кр}''$ с увеличением толщины покрытия до определенной величины. В дальнейшем величина критической деформации имеет тенденцию снижения.

Это обусловлено тем, что напыленное покрытие повышает напряженное состояние в межфазной зоне, идет перераспределение дислокаций и их закрепление. С ростом толщины покрытия напряженность немного увеличивается, начинают действовать новые источники дислокаций, срабатывание которых происходит уже при меньших напряжениях. Таким образом, речь идет о процессах, которые протекают в первую очередь в поверхностных слоях основы, в межфазной зоне и в самом покрытии. Из результатов следует вывод о решающем вкладе самого покрытия в процесс ВТ.

В дополнение к вышесказанному на рис. 6,а, б в качестве примера приведены данные измерений АЗВТ и ТЗВТ (Q^{-1}) в образцах из железа (кривая 1) и системы «Fe – Mo» (кривая 2), а также непосредственно для покрытий из Mo (кривая 3) после обработки этих измерений, согласно разработанной методике [4]. Расчетные кривые (4)–(7) на рис. 6,а характеризуют потери энергии в покрытиях при различных возможных соотношениях модулей упругости покрытия и основы $\bar{E}=E_n/E_0$.

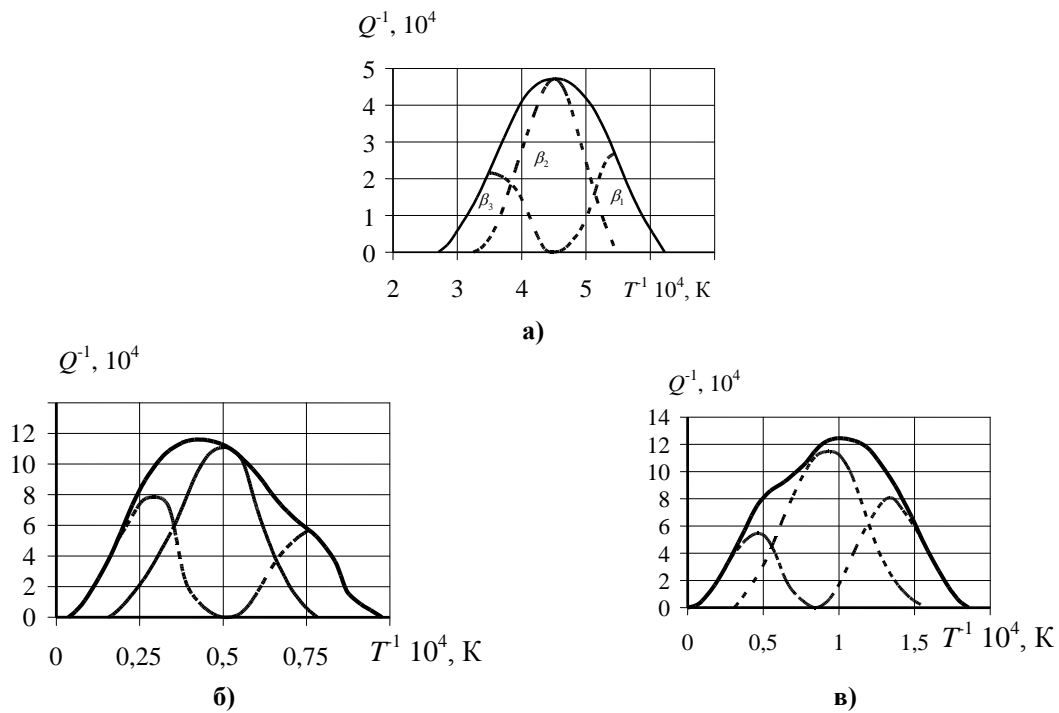


Рис. 4. Низкотемпературный спектр внутреннего трения (β – релаксации) железа с молибденовым покрытием, напыленным в динамическом вакууме, в зависимости от толщины слоя: а – 7 мкм; б – 50 мкм; в – 60 мкм

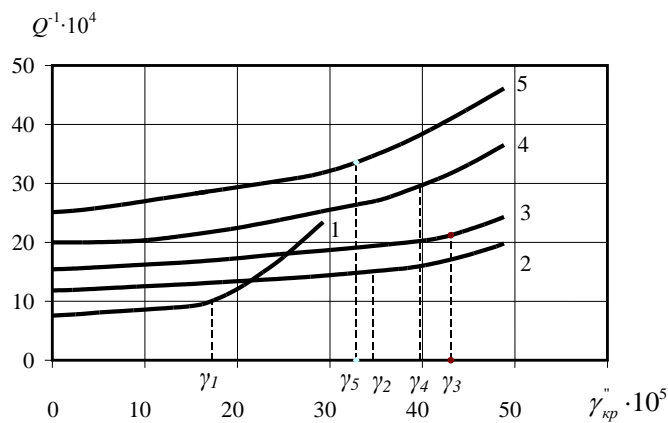


Рис. 5. АВТ для системы Fe – Mo в зависимости от толщины Mo покрытия, напыленного в динамическом вакууме: 1 – 20 мкм; 2 – 30 мкм; 3 – 50 мкм; 4 – 60 мкм; 5 – 80 мкм

Деформированный молибден по сравнению с другими материалами характеризуется более интенсивным изменением внутреннего трения с повышением амплитуды циклических напряжений. Это свидетельствует о формировании в молибдене в процессе деформации большой плотности легкоподвижных дислокаций, обуславливающих высокий уровень внутреннего трения за счет дислокационного затухания. Микропластическое внутреннее трение обусловлено движением свежих дислокаций, образованных в ходе деформации. Более высокий характер ВТ самого Mo покрытия (рис. 6, кривая 3) указывает на то, что в материале существуют источники с низким пороговым напряжением срабатывания, что облегчает процесс размножения дислокаций. Такое поведение молибдена характерно, как в случае крутильных колебаний, так и при других видах циклического нагружения, например, при фреттинге [5].

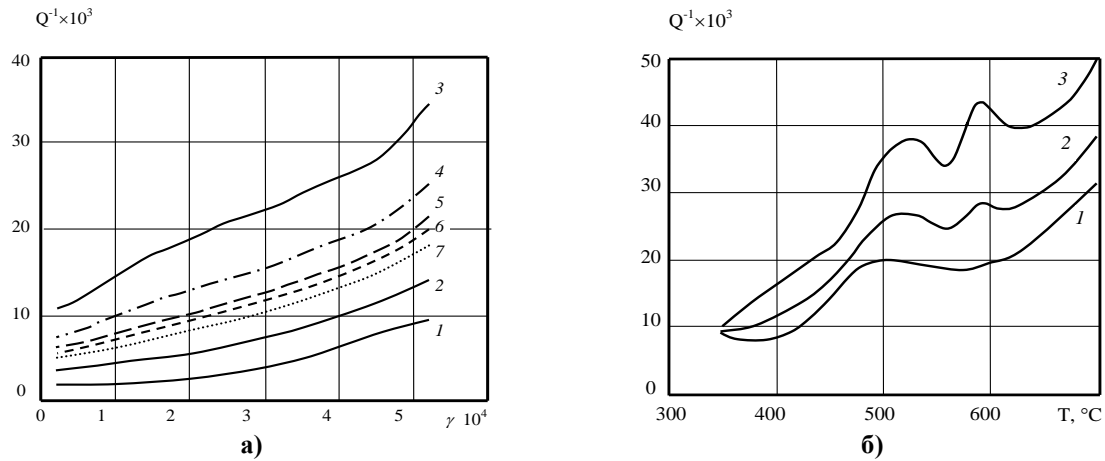


Рис. 6. АЗВТ (а) и ТЗВТ (б) для системы (Fe–Mo): 1 – кривая для железа без покрытий; 2 – с покрытиями; 3 – отдельно для покрытий из Мо; кривые (4)–(7) для покрытия рассчитаны для $\bar{E}=0,5; 0,8; 1,0; 1,5$, соответственно

Последующий после напыления покрытий диффузионный отжиг приводят к изменению АЗВТ армко-железа, а также критической амплитуды напряжений $\gamma''_{кр}$ (рис. 7). После перестройки кривых АЗВТ в координаты Гранато-Люкке получены параметры дислокационной структуры (L_N, L_C), которые отвечают отмеченным термообработкам (табл. 1). Согласно данным рис. 7 и табл. 1 покрытие по мере усиления диффузионного отжига приводит к изменению хода кривых АЗВТ и критических амплитуд напряжений γ' и γ'' , первая из которых характеризует напряжение, необходимое для возникновения АЗВТ, вторая является микроскопическим критерием пластичности. Увеличение $\gamma''_{кр}$ по мере отжига Мо покрытия и уменьшение дислокационной петли L_N , говорит о перестройке дислокационной структуры в силу массового движения дислокаций. Резкое уменьшение амплитуды $\gamma''_{кр}$ при напылении покрытия свидетельствует о более раннем начале микропластической деформации, и наоборот, увеличение $\gamma''_{кр}$ при повышении температуры отжига свидетельствует об упрочняющем эффекте. Изменение величин сегментов L_C можно объяснить, допустив, что наличие поверхностного слоя вызывает движение дислокаций и изменение числа точек закрепления, благодаря осаждению примесей.

Из результатов исследований ТЗВТ и АЗВТ следует, высокая плотность дислокаций обеспечивает относительно невысокую концентрацию точек закрепления дислокаций. Иначе говоря, в молибдене формируется благоприятное соотношение высокой плотности заблокированных малоподвижных дислокаций и количества подвижных точечных и линейных дефектов кристаллической структуры, что обеспечивает повышенные механических характеристик [5, 7, 10]. Кроме процессов отрыва дислокаций от блокирующих их атомов развивается процесс, связанный с оседанием примесных атомов (С, N₂, O₂) и их атмосфер на дислокациях и формированием пиков внутреннего трения. Суперпозиция различных релаксационных явлений и вызывает широкий максимум внутреннего трения в определенной области температур, как это наблюдается на рис. 1, 2, 4.

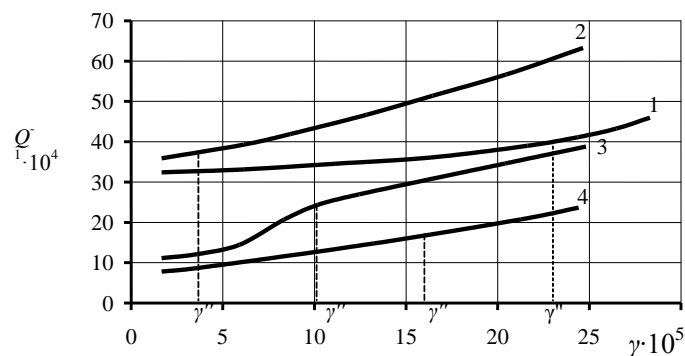


Рис. 7. АЗВТ системы Fe - Мо: 1 – образец без покрытия; 2 – с покрытием; 3 – с покрытием после отжига в течение 2 час. при 1273 К; 4 – с покрытием после отжига в течение 3 час. при 1373 К

Изменениями дислокационной структуры по сечению образца при наличии покрытий во многом определяются прочностные и деформационные свойства [7, 10]. В же время макро- и микроструктура отличается характерным напряженным состоянием, способствующим зарождению и развитию микротрещин [4].

С использованием разработанной методики оценки баланса энергий в условиях испытаний на изгиб системы «основа – покрытие» рассчитаны параметры трещиностойкости при растрескивании и отслоении покрытий, характеризующих в свою очередь когезионную и адгезионную прочности, соответственно.

В табл. 2 представлены конкретные значения интенсивности высвобожденной энергии и коэффициента трещиностойкости для использованных систем ΔG_{Σ} , K_{IC} . Полученные значения относятся к участкам самого покрытия (в случае растрескивания) и межфазной зоне (в случае отслоения), а также являются интегральными показателями (для системы в целом).

Таблица 1

Параметры дислокационной структуры системы железо - молибден

Термообработка	$\gamma' \cdot 10^6$	$\gamma'' \cdot 10^6$	$L_N \cdot 10^4$	$L_C \cdot 10^5$
Fe	40	240	0,65	1,24
Fe + Mo	16	50	7,40	8,70
Fe + Mo + отжиг (2 ч, 1023 К)	18	63	5,20	6,50
Fe + Mo + отжиг (2 ч, 1273 К)	27	100	2,20	3,00
Fe + Mo + отжиг (2 ч, 1373 К)	30	140	1,60	4,70
Fe + отжиг (3 ч, 1373 К)	60	160	1,40	4,30

Таблица 2

Параметры трещиностойкости молибденовых плазменных покрытий и системы

Параметры	Системы (общая)	Покрyтия (локальная, растрескивание)	Межфазной зоны (отслоение)	Покрyтия (эксперимент)
K_{IC} , МПа · м ^{1/2}	3,32	3,198	1,09	(0,93...3,2)
ΔG , Дж/м ²	100,28	92,99	10,92	

В табл. 2 в скобках представлены литературные данные. Табл. 2 отражает результаты альтернативных методов исследований коэффициентов трещиностойкости – при исследованиях внутреннего трения, на растяжение, изгиб, при индентировании. Наблюдается относительно большой разброс полученных результатов, разница между общей трещиностойкостью и трещиностойкостью, относящейся к локальным участкам покрытия, что можно объяснить, в том числе, и упругим несоответствием структурных элементов (составляющих) композиционного материала.

Выводы

Исследования ТЗВТ и АЗВТ молибденового покрытия на поглощение энергии упругих колебаний и механических характеристик позволяют заключить, что наличие границ зерен и разнообразие ориентаций последних обуславливает неоднородность действующих локальных напряжений, что приводит к возможности одновременного развития различных механизмов внутреннего трения. На температурном спектре наблюдается дифференциация основных эффектов – ЗГП (высокотемпературный) и β - релаксация (низкотемпературный). Высокотемпературный и низкотемпературный пики представляют собой суперпозицию нескольких различных релаксационных явлений, что вызывает широкий максимум внутреннего трения в определенной области температур

При действии нагрузок деформационные процессы локализуются в более тонких поверхностных слоях системы основа – покрытие. Релаксация напряжений в системе в первую очередь зависит от плотности и подвижности свободных дислокаций, наведенных как в процессе напыления, так и генерированных непосредственно в процессе действия внешних факторов, в том числе в процессе последующей термодиффузионной обработки.

Характер зарождения и развития микротрещин при деформировании обуславливается неравновесным состоянием границ между отдельными компонентами покрытия, уровнем их взаимодействия в зоне контакта.

Развития различных механизмов внутреннего трения, обусловленных неоднородностью действующих по сечению образца напряжений, коррелирует с процессами, определяющими параметры интенсивности высвобожженной энергии G_c и коэффициентов интенсивности напряжений K_{Ic} , при отслоении или растрескивании покрытий.

Список использованной литературы

1. Барвинок В. А. Физическое и математическое моделирование процесса формирования мезоструктурно-упорядоченных плазменных покрытий [Текст] / В. А. Барвинок, В. И. Богданович // Журнал технической физики. – 2012. – т. 82, вып. 2. – С. 105 – 112.
2. Копылов В. И. Взаимосвязь между вязкостью разрушения и адгезионно-когезионными характеристиками газотермических покрытий [Текст] / В. И. Копылов, Д. А. Антоненко // Проблемы техники, 2013.- № 4.- С.
3. Шевеля В. В. Трибохимия и реология износостойкости [Текст] / В. В. Шевеля, В. П. Олександренко. – Хмельницкий: ХНУ.- 2006. – 278 с.
4. Kopylov V. I. Effect of multiphase structure of plasma coatings on their elastic and strength properties / V. I. Kopylov Eastern-European Journal of Enterprise Technologies.- 5/5 (83).– 2016.
5. Шевеля В. В. Повышение фреттингостойкости титановых сплавов плазменными покрытиями [Текст] / В. В. Шевеля, А. Н. Химко, В. А. Краля, А. С. Трытек // Проблеми трибології.-2008.- № 4(50).- С. 105-114.
6. Головин С. А. Упругие и демпфирующие свойства конструкционных металлических материалов [Текст] / С. А. Головин, А. Пушкар, Д. М. Левин. – М.: Металлургия. – 1987. – 193 с.
7. Копылов В. И. Физико-механические характеристики и внутреннее трение материалов с многофазными плазменными покрытиями [Текст] / В. И. Копылов, Д. А. Антоненко // Проблемы техники. – 2014. – № 2. – С. 72 – 89.
8. Подрезов Ю. Н. Влияние структуры на механические свойства деформированных ОЦК металлов [Текст] / Ю. Н. Подрезов, С. А. Фирстов, В. И. Копылов // Физика и техника высоких давлений. – 2001. – № 1. – С. 137 – 140.
9. Коваль А. Ю. Влияние длины и остроты концентраторов напряжений на трещиностойкость молибдена [Текст] / А. Ю. Коваль, С. А. Фирстов // Электронная микроскопия и прочность материалов. – Киев: Ин-т пробл. материаловедения НАН Украины, 2006. – С. 177 – 182.
10. Копылов, В. И. Основные особенности формирования многокомпонентных газотермических покрытий, обуславливающие физико-механические свойства композиций при напылении [Текст] / В. И. Копылов, И. А. Варвус, Б. Г. Стронгин // Физ. - хим. механика материалов. – 1991. – №1. – С. 65 – 70.
11. Копылов В. И. Влияние состава и микроструктуры керамических оксидных покрытий на физико-механические свойства композиционных материалов [Текст] / В. И. Копылов, И. В. Смирнов, С. В. Рыбаков // Проблемы техники. – 2005. – №2. – С. 3 – 19.