

УДК 620.178.152

Никитин Ю.А., Запорожец В.В.

Национальный авиационный университет. Украина, г. Киев.

ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ И ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ОСНОВЫ МИКРОМЕХАНИЧЕСКИХ ИСПЫТАНИЙ МАТЕРИАЛОВ СВЕРХНИЗКОЙ ПЛОТНОСТИ (часть 2)

Анотація

Представлено аналіз розвитку методів мікромеханічних іспитів поверхневого шару суцільних матеріалів, на основі якого обґрунтовано методологічні підходи мікромеханічних іспитів композиційних матеріалів наднизької щільності із використанням методу трибо-спектрального аналізу.

Abstract

The analysis of development of methods of micromechanical tests on which basis it is proved development methodology method of the tribospectral analysis for composition materials of the ultralow density is presented

Постановка проблемы

Для управления созданием композиционных материалов сверхнизкой плотности и изделий на их основе, обладающих особыми физико-механическими свойствами поверхности, необходимо разработать теоретические и экспериментальные основы оценки деформационно-прочностных их поверхностного слоя.

Анализ последних исследований и публикаций

Одним из направлений развитием методов микромеханических испытаний было разработка методологии склерометрии и создания приборов для оценки твердости/микротвердости путем царапания и регистрации размеров царапины поверхностного слоя материала [1, 2].

Развитием методологии перемещения индентора по поверхности материала является метод



трибо-спектрального анализа деформационно-прочностных свойств поверхностного слоя материалов, предложенный и развиваемый д.т.н., профессором В. В. Запорожцем с 1965 года.

Методология трибо-спектрального метода основана на решении обратной задачи трибометрии, когда поверхностный слой представляется в виде поля со случайно изменяющимися механическими свойствами и производят определение статистических связей между сопротивлением локальных микрообъемов материала контактному деформированию с использованием методов анализа случайных процессов [3].

Согласно трибо-спектральному методу в поверхность образца внедряют нагруженный индентор и осуществляют перемещение в режиме упруго-пластического деформирования. В процессе перемещения образца индентор осуществляет вынужденные колебания, характер которых обусловлен различным физическим сопротивлением структуры поверхностного слоя материала. Сопротивление упруго-пластическому деформированию внутри и на границах фрагментов структуры носит случайный характер и соответствует мгновенным изменениям тангенциальной и нормальной составляющих внешней нагружающей силы перемещения индентора, которые измеряют в реальном масштабе времени и преобразовывают с помощью датчиков в электрические сигналы. В результате равномерного перемещения процесс изменения тангенциальной и нормальной реакции нагружающей силы представляет собой совокупность колебательных полигармонических или случайных в общем случае процессов с характеристиками, зависящими от размеров фрагментов, блоков и других структурных составляющих материала, обладающих разным сопротивлением контактному деформированию.

Для обработки регистрируемых в реальном масштабе времени экспериментальных результатов используют метод идентификации случайных процессов, например преобразование Фурье, который позволяет осуществить простую интерпретацию получаемых результатов путем их спектрального анализа с применением компьютера. Результатом микромеханических испытаний является оценка характеристик спектральной плотности, которые имеют максимумы при частотах, соответствующих размерам фрагментов, блоков и других структурных составляющих материала. Дисперсия процесса, характеризует неоднородность размера и прочностных свойств структурных элементов поверхностного слоя материала и определяется, как площадь под кривой спектральной плотности [4].

Дальнейшее развитие методологии трибо-спектрального метода позволило повысить точность оценки деформационно-прочностных свойств

поверхностного слоя сплошных материалов и их неоднородности [5–8].

Так, например, было предложено повысить точность сравнительной статистической оценки физико-механических свойств материалов за счет перемещения по поверхности исследуемых материалов нагруженного индентора при одинаковых условиях микромеханических испытаний (равенство площадей контакта индентора с исследуемой поверхностью) и осуществления регистрации частотного спектра сил сопротивления перемещению индентора [6]. Также, повышение точности оценки неоднородности физико-механических свойств поверхностного слоя материала предложено обеспечить за счет двухкратного перемещения индентора. Первое перемещение индентора осуществляют при нагрузке, соответствующей переходу материала от упругого к пластическому деформированию. Повторное перемещение индентора при нагрузке превышающей предыдущую нагрузку. С учетом полученных оценок шероховатости поверхности и спектральной плотности определяют неоднородность физико-механических свойств материалов [7, 8]. Для металлов и различных сплавов был разработан ряд критериев диагностики поверхностного слоя деталей и образцов в различных условиях внешнего нагружения. Было предложено использовать при анализе состояния поверхности такие параметры, как: фазово-частотная характеристика, которая отражает реологические свойства поверхности; функция когерентности, которая оценивает однородность трибологического процесса; корреляционная функция, оценивающая связанность характеристик прочности поверхности [9, 10].

Таким образом, было сформировано понятие однородности и методология оценки состояния поверхностного слоя сплошных материалов в связи с напряженным состоянием и наличием концентраторов [11].

С 1980-х годов последующее развитие методологии шло по пути формирования и развития направлений прикладного использования разработанной методологии и совершенствования инструментальных средств реализующих трибо-спектральный метод.

Были разработаны методы диагностики качества поверхности при отделочной абразивной обработке нержавеющей сталей [12].

Было установлено, что характеристики и параметры трибо-спектрального метода несут существенную информацию о процессе повреждаемости поверхностного слоя.

Так, на основе трибо-спектрального метода разработан способ неразрушающего контроля усталостной прочности материалов, который обеспечивает высокую достоверность определения

сроков профилактических осмотров элементов конструкций, а также позволяет исследовать динамику изменения усталостной прочности материалов и прогнозировать техническое состояние элементов конструкций. Сущность способа заключается в циклическом приложении нагрузки к материалу элемента конструкции и последовательное определение параметров, характеризующих свойства поверхности материала элемента конструкции в процессе приложения нагрузки, по изменению которых судят о степени усталости. Для этого осуществляют перемещение индентора с постоянной скоростью в поверхностном слое элемента конструкции и регистрируют частотный спектр изменения усилия перемещения индентора, который отражает структурные изменения поверхностного слоя. По мере уменьшения усталостной прочности увеличивается ширина частотного спектра сигнала, снимаемого с индентора, а из-за микротрещин изменяется амплитуда частотных составляющих сигнала [13, 14].

Также, на основе трибо-спектрального метода разработаны подходы оценки процесса повреждаемости композиционных материалов при малоцикловом нагружении путем оценки момента: зарождения микротрещин; появления и развития макротрещин и магистральной трещины [15–18]. Установлено, что трибо-спектральный метод может быть использован для выбора метода упрочнения поверхностного слоя и оптимизации режимов поверхностного пластического деформирования композиционных материалов с целью повышения сопротивляемости усталости [19], а также оценки повреждаемости, растительных материалов в процессе водного стресса и завядания и идентификации вида растительных тканей [20].

Формулирование целей статьи (постановка задач)

Если раннее развитие трибо-спектрального метода и инструментальных средств его реализации шло по пути прикладного использования разработанной методологии для сплошных материалов, то в данной работе рассмотрены вопросы развития методологии трибо-спектрального метода для оценки деформационно-прочностных свойств поверхностного слоя материалов, имеющих низкую и сверхнизкую плотность (от 50 кг/м^3).

Изложение основного материала исследования

Принципы оценки деформационно-прочностных свойств участка поверхности основываются на использовании динамической модели контактного взаимодействия индентор-поверхность материала сверхнизкой плотности, которые имеют сложные структурные элементы, а прочность внутри структурных элементов и на их границах может то уменьшаться, то увеличиваться.

Динамическая модель контактного взаимодействия индентор-поверхность основывается на

представлении поверхности материала сверхнизкой плотности в виде полупространства, состоящего из фрагментов, обладающих разными геометрическими и прочностными свойствами в направлении распространения деформационного процесса при сканировании поверхности с нагрузкой на индентор $P_{\text{и}}$ вдоль некоторого линейного участка со скоростью $V_{\text{нагр}}$. При преодолении сопротивления деформированию действующая сила P_c равна сумме нормальной P_n и тангенциальной P_T составляющих. Под воздействием внешней нагрузки возникает сила F_p обратная по направлению действия силы трения F_a , а также действию нормальной силы R_a и обратной по направлению уравнивающей силе R_p . Таким образом, процесс перемещения индентора сопровождается множественным количеством контактов, которые обуславливают случайный характер изменения сил P_T и P_n , для анализа которых могут быть использованы характеристики случайного процесса.

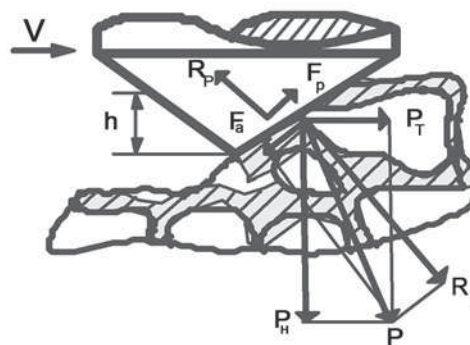


Рис. 1. Динамическая модель контактного взаимодействия индентор-поверхность материала сверхнизкой плотности

Согласно представленной модели можно произвести мгновенную оценку изменений выходного сигнала, который является носителем статистической информации о деформационно-прочностных свойствах материала сверхнизкой плотности (рис. 1) [21].

Для оценки состояния структуры поверхностного слоя динамическая модель может быть представлена в виде динамической системы с одним входом и одним выходом, для которой заданы (рис. 2):

- входное воздействие $X(t)$ подмножества мгновенных значений X из множества допустимых значений Ω входных воздействий:

$$X(t) \in X \subset \Omega, \quad (1)$$

- входное воздействие $Y(t)$ подмножества мгновенных значений Y из множества допустимых значений Γ входных воздействий:

$$Y(t) \in Y \subset \Gamma, \quad (2)$$

• моменты времени t множества T моментов времени, на котором анализируется система:

$$t \in T, \quad (3)$$

• состояние (свойство структуры) системы $u(t)$ множества u состояний:

$$u(t) \in u, \quad (4)$$

• оператор I выходов системы, устанавливающий функциональную связь между состоянием системы и ее выходной величиной:

$$Y(t) = I[u(t), t], \quad (5)$$

• оператор переходов J , устанавливающий функциональную связь между исходным состоянием системы и состоянием, измененным под действием входного воздействия на некотором отрезке $w(\tau, t)$:

$$u(t) = J\{\tau, t, u(\tau), w(\tau, t)\}. \quad (6)$$

Решение модели динамической системы сводится к заданию величин $\{T, u, X, \Omega, Y, \Gamma, I, J\}$ и анализу трибологических операторов I, J и множества $T, U, X, \Omega, Y, \Gamma$, которые необходимо конкретизировать с использованием как параметрических, так и непараметрических (многопараметрическими) методов анализа временных рядов [22–24].

модель динамической системы отображается передаточной функцией, разложением в ряды Фурье, Вольтера и другие. Использование метода преобразования Фурье для корреляционно-спектрального анализа и идентификации случайных временных рядов и динамических систем позволяет конкретизировать операторы I, J и множества U в виде комплексной частотной характеристики $K(f)$ динамической системы и для конкретизации множества T, X, Ω, Y, Γ в виде спектральной плотности входного и выходного воздействия $S(f)$ [21].

Можно представить несколько случаев изменения напряженно-деформируемого состояния контакта индентор – поверхность материала сверхнизкой плотности, который содержит такие структурные элементы, как полимер, наполнитель и газовую фазу (рис. 3, а). Так как скорость распространения деформационного процесса постоянна, то произведя замену аргумента времени t на аргумент линейного размера L в функциональной зависимости силы деформирования от времени получим зависимость силы деформирования от размеров структурных элементов и структурных фрагментов внутри и между ними:

$$P = \varphi(t), \quad (7)$$

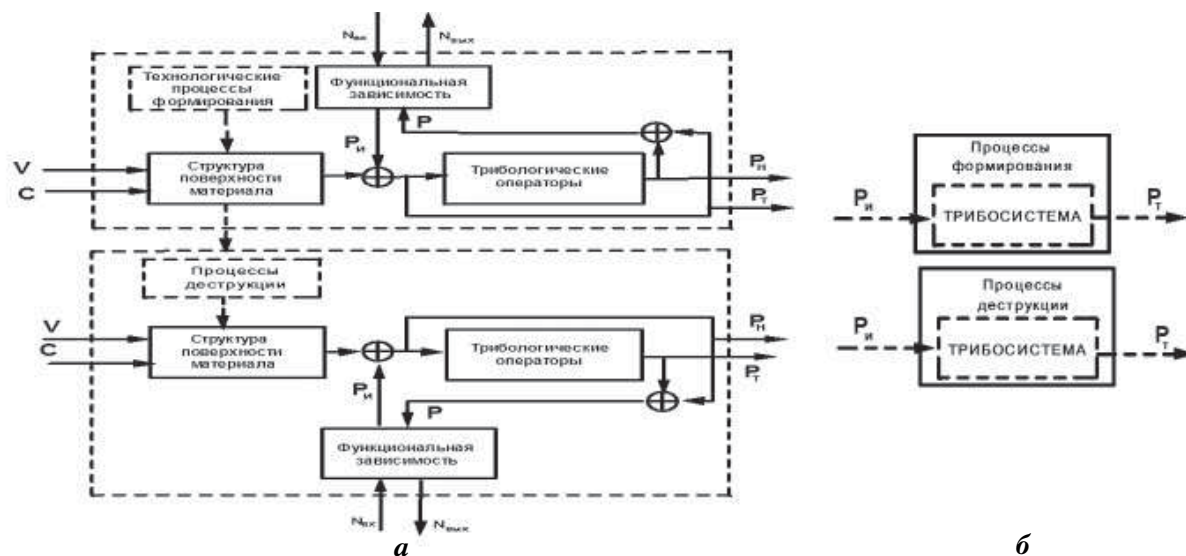


Рис. 2. Динамическая система оценки деформационно-прочностных свойств поверхности материала сверхнизкой плотности:

а – общий вид; б – контакт индентор/поверхность

При использовании параметрического метода модель динамической системы задается, например дифференциальными или разностными уравнениями. Использование параметрических методов наиболее выгодно при небольшой выборке числа наблюдений, но если выборка увеличивается (≥ 1000), то для адекватного описания временного ряда требуется введение большого числа параметров, физический смысл которых трудно поддается интерпретации. В таком случае целесообразно использовать непараметрические методы, когда

$$t = L/V_{\text{нагр}}, \quad (8)$$

$$P = \varphi(L). \quad (9)$$

Пусть $\delta(L)$ – некоторая функция, отражающая деформационно-прочностные свойства поверхностного слоя вдоль трассы сканирования. В случае, если изменение деформационно-прочностных свойств $\delta(L)$ вдоль участков $[L_1 - L_2]$ и $[L_3 - L_4]$ статистически неразличимо, то такая структура является однородной (рис. 3, б–г). Два линейных участка $[L_1 - L_2]$ и $[L_3 - L_4]$ являются неоднородными, поскольку график изменения микромехани-

ческих свойств $\delta(L)$ вдоль этих участков статистически различим (рис. 3, *e*) [25, 26].

Для количественной оценки состояния поверхностного слоя определяют статистическую различимость линейного участка и выбирают длину трассы сканирования таким образом, чтобы измеряемая величина $\delta(L)$ была статистически различима.

В одном случае поверхность материала представляет структурные элементы газовой фазы в виде ячеек газонаполненного полимерного материала (рис. 3, *б*). Характеристика спектральной плотности имеет основную амплитуду изменения процесса $\delta(L)$ на низкой частоте, свидетельствуя об однородной крупно-фрагментной структуре (рис. 3, *в*).

В другом случае поверхность материала включает структурные элементы твердой полимерной фазы (рис. 3, *з*), когда спектральная плотность имеет максимальную амплитуду изменения процесса $\delta(L)$ на высокой частоте, что соответствует однородному состоянию мелко-фрагментной структуры (рис. 3, *д*).

Третий случай характеризует наличие структурных элементов в виде газовой фазы (ячеек), твердой полимерной фазы (структурные элементы типа «тяж» и «перемычка») и наполнителя (рис. 3, *е*). В этом случае, характеристика спектральной плотности имеет несколько характерных амплитуд процесса $\delta(L)$, что свидетельствует о наличие структурных элементов разной размерности, что соответствует неоднородному состоянию структуры (рис. 3, *ж*). Комплексная оценка деформационно-прочностных свойств участка поверхностного слоя материала сверхнизкой плотности может быть произведена путем взаимного анализа нормальной $P_n(t)$ и тангенциальной $P_t(t)$ составляющей силы сопротивления деформированию $P_c(t)$ [26].

Основываясь на том, что случайное изменение силы сопротивления деформированию $P(t)$ обуславливает изменения глубины внедрения индентора $h(t)$, учитывая зависимости (7–9), известные зависимости для расчета микротвердости методом царапания [1], деформационный процесс можно представить в виде линейной системы, входным сигналом которой является мгновенное изменение глубины внедрения индентора $h(L)$, а выходным сигналом является величина мгновенной истинной нанотвердости $HV_h(L)$:

$$HV_T^h(L) = P_T(L) : h^2(L) \text{tg} \alpha / 2, \quad (10)$$

$$HV_H^h(L) = P_H(L) : h^2(L) \text{tg} \alpha / 2, \quad (11)$$

где α – угол между ребрами индентора в виде пирамиды.

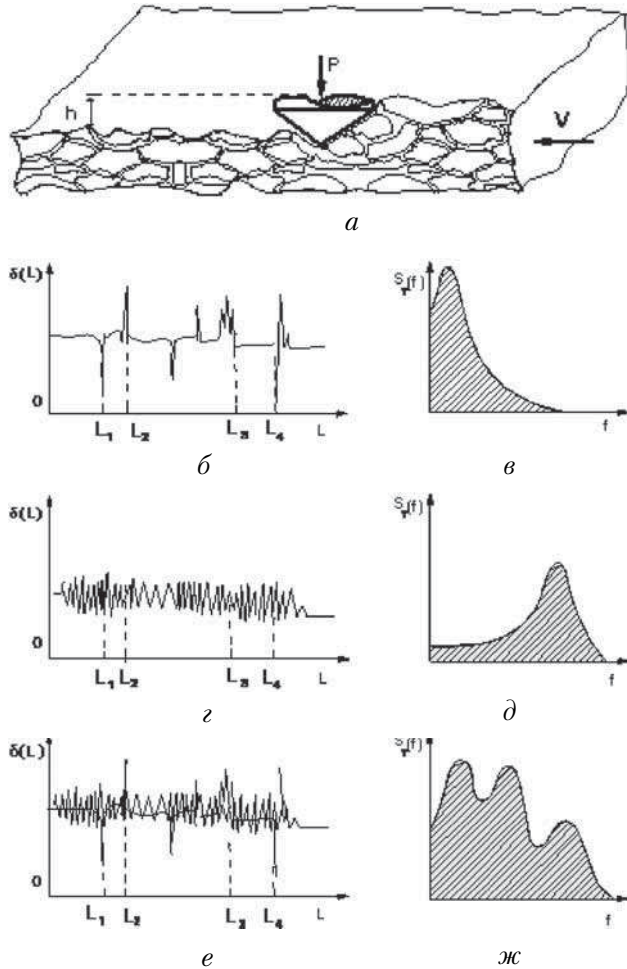


Рис. 3. Принципы оценки деформационно-прочностных свойств (*в*, *д*, *ж*) участка поверхности (*а*) материала сверхнизкой плотности случайно изменяющейся структуры: *б* – однородная структура больших размеров; *з* – однородная структура мелких размеров; *е* – неоднородная структура

Основываясь на таком подходе можно произвести формирование топографического изображения структурных элементов поверхностного слоя материала сверхнизкой плотности, после выделения плоскости поверхности, где должно быть выбрано поле N прямолинейных участков длиной L для их последовательного плоскопараллельного сканирования (рис. 4, *а*).

Измеренные мгновенные изменения тангенциальной P_T и нормальной P_H составляющих силы P_c , преобразуют в аналоговые сигналы и определяют мгновенную величину истинной микро/нанотвердости, а различная последовательность и продолжительность аналоговых сигналов является мерой размера структурных элементов материала сверхнизкой плотности (рис. 4, *б*).

Последующее формирование топографического изображения поверхности материала сверхнизкой плотности может быть реализовано с использованием принципа разворачивания.

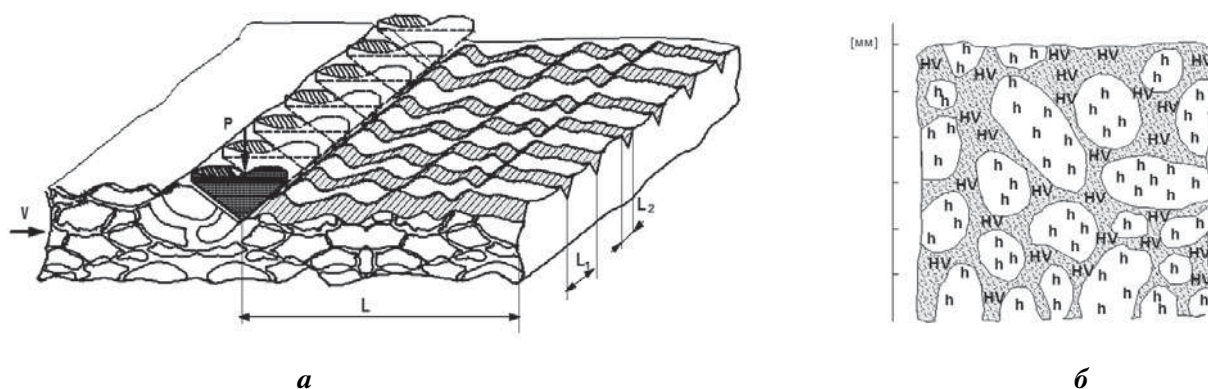


Рис. 4. Принципы получения топографического изображения поверхности материала сверхнизкой плотности: а – случайно изменяющаяся структура поверхности; б – структура газонаполненного композита

В тоже время следует учитывать, что на четкость получаемого изображения существенное влияние будет оказывать расстояние между параллельными линиями сканирования L_1 . С одной стороны для получения как можно более четкого изображения необходимо, чтобы расстояние между параллельными линиями сканирования уменьшалось, т.е. $L_1 \rightarrow 0$, а с другой стороны при уменьшении этого расстояния возникает проблема влияния деформируемой зоны на процесс сканирования последующей зоны. В любом случае при соответствующем подборе глубина проникновения индентора в поверхность должна быть минимальной для повышения точности получаемого топографического изображения и уменьшения эффекта взаимного влияния зон деформирования вдоль линий предыдущего сканирования. Следует отметить, что получение изображения представляет собой достаточно сложную практическую задачу, которую необходимо решать с использованием автоматизированных средств и методов компьютерной обработки микромеханических испытаний.

Развитие методологии и инструментальных средств реализации трибо-спектрального метода применительно к материалам сверхнизкой плотности позволило сформировать ряд направлений прикладного использования разработанной методологии.

Так, разработаны подходы оценки процессов формирования, деформирования [21, 28], и термоокислительной устойчивости [27] материалов низкой и сверхнизкой плотности, что позволило осуществить управление созданием нового класса композиционных материалов терморасширенного графита [26, 29], обладающие повышенными деформационно-прочностными и абляционными свойствами поверхностного слоя.

Выводы

Разработана методология оценки деформационно-прочностных свойств материалов сверхнизкой плотности, что открывает возможности

широкого использования трибо-спектрального метода для управления созданием новых композиционных материалов сверхнизкой плотности с заданными физико-механическими свойствами их поверхности.

Литература

1. Григорович В.К. Твердость и микротвердость металлов. – М.: Наука, 1976. – 230 с.
2. Голего Н.Л., Запорожец В.В., Бердинских В.А., Исак Е.Г. Прибор для измерения твердости царапанием // АС № 676908 СССР.G01N 3/46 – Б.И. № 28-1979.
3. Бердинских В.А., Запорожец В.В. Стохастические решения обратной задачи трибометрии // Трение и износ. – Минск: Наука и техника, 1980. – № 6. – С. 978–986.
4. Запорожец В.В. Динамические характеристики прочности поверхностных слоев и их оценка // Трение и износ. – Минск: Наука и техника, 1980. – № 4. – С. 602–609.
5. Запорожец В.В., Бердинских В.А., Кордонский Х.Б., Пегов А.К. Основные принципы и аппаратура для корреляционной оценки поверхностных слоев деталей машин // Новые физические методы неразрушающего контроля качества продукции. – М.: МДНТИ, 1977. – С. 94–98.
6. Рыжов Э.В., Запорожец В.В., Варюхно В.В., Клименко С.А., Муковоз Ю.А., Рудник Г.И. Способ определения сравнительных физико-механических характеристик материалов // АС № 1758521 СССР. G01N 19/02 – Б.И. № 32-1992.
7. Запорожец В.В. Способ определения однородности физико-механических свойств материалов // АС № 1807328 СССР.G01N 3/46 – Б.И. № 13-1993
8. Запорожец В.В., Варюхно В.В. Взаимосвязь силы трения и свойства вторичных структур // Трение и износ. – 1983. – Т. 4. – С. 59–67.

9. *Запорожец В.В., Бердинских В.А.* Диагностика узлов трения авиационной техники и спецмашин. – Киев: КИИГА, 1987. – 163 с.
10. *Бердинских В.А.* Моделирование работы фрикционного контакта в связи с оценкой прочности поверхностного слоя пар трения / Автореферат кандидатской диссертации. – Киев: КИИГА, 1983. – 20 с.
11. *Запорожец В. В., Кордонский Х.Б., Оре О. В.* Деформационно-спектральный метод исследования однородности поверхностного слоя металлов // Надежность и долговечность машин. – 1990. Вып 17. – С. 57–65.
12. *Цыганов В.В.* Трибодиагностика качества поверхности нержавеющей сталей при отделочной абразивной обработке / Автореферат кандидатской диссертации. – Киев: КИИГА, 1989. – 23 с.
13. *Пегов А.К.* Деформационно-спектральный анализ прочности поверхностного слоя металлов / Автореферат кандидатской диссертации. – Киев: КИИГА, 1980. – 23 с.
14. *Запорожец В.В., Бердинских В.А., Кордонский Х.Б., Пегов А.К.* Неразрушающий способ определения степени усталости элементов конструкции // АС № 800800 СССР.G01N 3/06 – Б.И. № 4-1981.
15. *Никитин Ю.А., Варюхно В.В.* Оценка процесса повреждаемости в поверхностном слое материала деформационно-спектральным методом // Техническое диагностирование авиационных двигателей: Сб. научн. трудов. – Киев: КИИГА. – 1987. – С. 25–29.
16. *Запорожец В.В., Никитин Ю.А. Варюхно В.В.* Способ определения повреждаемости материала // АС № 1582066 СССР. G01n 3/06. – Б.И. № 28. – 1990.
17. *Никитин Ю.А., Запорожец В.В., Белякович О.Н.* Идентификация процесса повреждаемости поверхностного слоя материала // Вестник двигателестроения. – 2005. – № 2. – С. 100–105.
18. *Nikitin Yu.A., Zaporozec W. V., Zakijew I.M., Lukasik K.* Identyfikacja stopnia uszkodzen warstwy wierzchniej przez badania jej wtasciowosci mikromechanicznych // Przegląd Mechaniczny. – 2003. – №6. – Р. 20–23.
19. *Никитин Ю.А., Запорожец В.В.* Оценка влияния ППД на прочность материала с использованием методов микромеханики // Вестник двигателестроения. – 2002. – № 2. – С. 94–99.
20. *Мартыненко А.И., Никитин Ю.А., Новиков Е.П., Черныш И.Г.* Идентификация микроструктуры растительных тканей деформационно-спектральным методом // Доклады Российской Академии сельскохозяйственных наук. – 1997. – № 3. – С. 9–10.
21. *Zaporozhets V.V., Nikitin Yu.A.* Tribo-spectral method in microtribology and tribotesting // Scientific achievements industrial application future challenges, Tribology 2001. 2-nd World Tribology Congress. – September 3-7, 2001. Vienna, Austria. – P. 361–367.
22. *Мирский Г.Я.* Аппаратурное определение характеристик случайных процессов. – М.: Энергия, 1976. – 456 с.
23. *Райбман Н.С., Чадеев В.М.* Построение моделей процессов производства. – М.: Энергия, 1975. – 376 с.
24. *Марти Дж., Доэрти Р.* Стабильность микроструктуры металлических систем. – М.: Атомиздат, 1978. – 280 с.
25. *Нікітін Ю.О.* Питання мікромеханічних випробувань матеріалів на основі терморозширеного графіту (Огляд) // Вісник Житомирського інженерно-технологічного інституту. – 1999. – №9. – С. 39–45.
26. *Никитин Ю.А.* Новые направления в испытаниях поверхностного слоя легковесных материалов авиационно-космического назначения // Технологические системы. – 2006. – № 2 (34). – С. 49–55.
27. *Нікітін Ю.О., Гончарик В.П., Черниш І. Г., Закаєв І. М.* До питання оцінки термоокисної стійкості модифікованих форм терморозширеного графіту деформаційно-спектральним методом // Хімічна промисловість України. – 1999. – № 2. – С. 8–11.
28. *Nikitin Yu.A., Zaporozhets V.V., Chernysh I.G.* Tribo-spectral method and identification of the micromechanical characteristics of the exfoliated based materials // Proceedings of the National Aviation University. – 2003. – № 2. – P. 91–95.
29. *Нікітін Ю.О.* Питання управління створенням легковагих матеріалів // Вісник академії інженерних наук. – К.: КПІ, 2007. – № 1. – С. 47–54.