

# ПРОИЗВОДСТВЕННЫЙ РАЗДЕЛ

УДК 621.921

## Резонансный метод контроля неупругости конструкционных материалов

**А. Н. Майло**

Институт проблем прочности им. Г. С. Писаренко НАН Украины, Киев, Украина

*Предложен метод, позволяющий контролировать кинетику неупругости поликристаллического материала по изменению угла сдвига фаз между напряжением и деформацией в локально нагруженной области поверхности исследуемого материала. С помощью метода можно определять текущее значение поврежденности исследуемого алюминиевого сплава в условиях лабораторных испытаний при циклическом нагружении по изменению статистических характеристик распределения угла сдвига фаз. В качестве исследуемого материала выбран алюминиевый сплав АМг6Н, относящийся к циклически упрочняющимся материалам.*

**Ключевые слова:** циклическое нагружение, неупругость, микропластические деформации, петля гистерезиса, добротность колебательной системы, резонансная характеристика.

Для всех конструкционных материалов характерно рассеяние механических свойств при деформировании из-за несовершенства структуры материала, обусловленного наличием острых углов, дефектов кристаллической решетки, несимметричностью структурных элементов и др. Эти факторы являются концентраторами напряжений на макро-, микро- и субмикроскопическом уровнях. Данные работы [1] дают количественную оценку размера структурного элемента (зерна) в объеме исследуемого поликристаллического материала. Соотношение размеров зерен может изменяться в пределах порядка, размеров блоков зерен – в несколько раз. Несовершенство структуры поликристаллического материала приводит к его неоднородному напряженному состоянию при нагружении. При этом значения напряжений в локальных объемах материала могут в два-три раза превышать номинальное [2–4], вследствие чего пластическая деформация поликристаллического материала протекает неоднородно по всему объему.

В условиях циклического нагружения микропластическая деформация является одним из основных факторов изменения механических свойств. Количественной характеристикой процесса микропластического деформирования служит неупругая деформация за цикл. В координатах напряжение–деформация изменение механических свойств материала при циклическом нагружении описывается замкнутой петлей гистерезиса. Ширина такой петли равна неупругой деформации за цикл, что позволяет количественно оценить

поврежденность поликристаллического материала [5–7]. Структура напряжений конструкционного материала, заданная его несовершенством, под действием циклического нагружения изменяется с каждым циклом, что приводит к снижению пределов пропорциональности и текучести. Это явление известно как “эффект Баушингера” [8] (упрочнение или разупрочнение в условиях циклического нагружения).

Неоднородность напряженного состояния может быть выражена характеристикой статистического распределения величины микропластической деформации [2, 3]. Кинетика микропластического деформирования будет соответствовать характеру накопления поврежденности материала до тех пор, пока изменяется объем локализации усталости. Существует много методов, которые позволяют интегрально оценить неупругую деформацию в материале за цикл: калориметрический [9]; фазовый [10]; свободных затухающих колебаний [11]; Кимбалла–Лазана [12]; кривой резонанса [13]; динамической петли гистерезиса [10]. Недостатком этих методов является то, что интегральная характеристика неупругости материала в полной мере не описывает изменения структуры материала, отмеченные в работе [14]. Кроме того, их использование не позволяет определить неупругие деформации при амплитуде циклических напряжений ниже предела выносливости исследуемого материала. Минимально определяемый с помощью метода динамической петли гистерезиса уровень неупругой деформации составляет  $10^{-6} \dots 10^{-7}$  мм/мм. Эти недостатки обуславливают необходимость разработки методов локального контроля неупругости поликристаллического материала.

В данной работе предлагается метод, который позволяет контролировать кинетику неупругости материала по изменению фазочастотных параметров колебательной системы образец–силовозбудитель. Он представляет собой модификацию метода для исследования внутреннего трения поликристаллического материала, в котором используется составная высокодобротная колебательная система в виде стержня, длина которого кратна половине длины волны на частоте основного продольного резонанса [15, 16]. Добротность  $Q$  нагруженной колебательной системы на порядок выше таковой исследуемого поликристаллического материала. Параметры колебательной системы, состоящей из исследуемого материала (образца) и пьезоэлектрического элемента, определяются интегрально по углу сдвига фаз электромеханической колебательной системы.

На рис. 1 показана схема электромеханической колебательной системы [17], состоящей из активного элемента, в качестве которого используется пьезоэлектрический полуволновой стержень. Поперечное сечение стержня имеет прямоугольную форму. На противоположных боковых гранях стержня (в плоскостях, перпендикулярных направлению поляризации) нанесены электроды. Потенциальный электрод разделен симметрично относительно узлового сечения на две части, к одной из которых прикладывается переменное электрическое напряжение  $U_{\sigma}$ . В результате действия обратного пьезоэлектрического эффекта стержень упруго деформируется в продольном направлении, в то время как прямой пьезоэлектрический эффект приводит к появлению электрического напряжения  $U_{\varepsilon}$ , пропорционального деформациям, на потенциальной электродной поверхности. Пьезоэлектрический стержень вследст-

вие обратимости пьезоэффекта служит и силовозбудителем, и датчиком. Торцевая поверхность, взаимодействующая с поверхностью исследуемого материала, имеет сферическую форму.

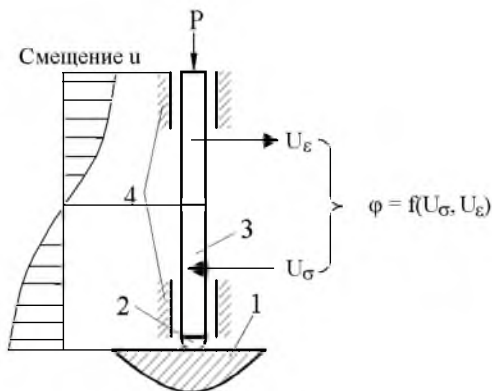


Рис. 1. Схема силонагружающего устройства: 1 – исследуемая поверхность; 2 – торцевая поверхность; 3 – пьезоэлектрический стержень; 4 – направляющие;  $\varphi$  – угол сдвига фаз;  $P$  – статическая нагрузка.

На рис. 2 приведена резонансная характеристика датчика измерительной системы для уровня входного напряжения  $U_{вх} = 0,5$  В, при котором параметры колебательной системы линейны. Чувствительность метода оценивали по диапазону контролируемого параметра (угол сдвига фаз) при перемещении зоны контактного взаимодействия по поверхности исследуемого материала. Диапазон изменения угла сдвига фаз относительно максимального значения составляет около 30%. Расходуемая на деформирование материала в зоне контакта энергия (рис. 3) приводит к изменению резонансных характеристик колебательной системы и, как следствие, ее добротности. Различие в добротности, определенной по методу кривой резонанса [18], для ненагруженного датчика и под нагрузкой составляет 29%. Результатом нелинейности механических характеристик материала является сдвиг фаз на угол  $\varphi$  между электрическим напряжением возбуждения  $U_{\sigma}$  пьезоэлектрического стержня и электрическим напряжением  $U_{\epsilon}$ , возникающим вследствие прямого пьезоэффекта. Изменение величины угла сдвига фаз выражается функцией  $\varphi = f(U_{\sigma}, U_{\epsilon})$ . С учетом электромеханической аналогии между колебаниями механической системы и электрической цепи, которые описываются одними и теми же дифференциальными уравнениями, угол сдвига фаз между электрическим напряжением и током эквивалентен углу сдвига между механическим напряжением и деформацией.

Угол сдвига фаз  $\varphi$  между механическим напряжением и деформацией и неупругая деформация  $\Delta\epsilon$  за цикл связаны соотношением [10]

$$\Delta\epsilon = \frac{2\sigma_a \sin \varphi}{E(1 - \sin \varphi)}, \tag{1}$$

где  $\sigma_a$  – амплитуда циклических напряжений;  $E$  – модуль упругости при растяжении.

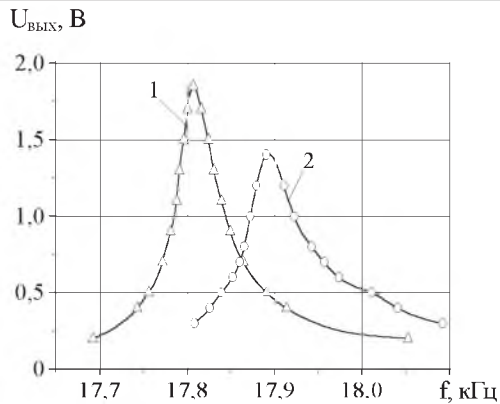


Рис. 2. Резонансные характеристики датчика колебательной системы: 1, 2 соответственно датчик без нагрузки и с нагрузкой.

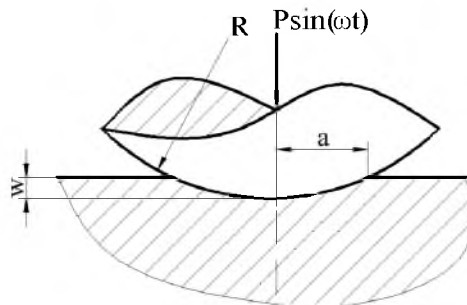


Рис. 3. Схема контакта торцевой поверхности с материалом:  $R$  – радиус торцевой поверхности;  $w$  – перемещение в зоне контакта;  $a$  – радиус контакта;  $P \sin(\omega t)$  – нагрузка.

В условиях циклического нагружения при напряжении предела выносливости и выше рассеяние энергии в основном обусловлено микропластическими деформациями [10]. Предложенный метод позволяет контролировать неупругость поверхностного слоя исследуемого материала локально (локальность определяется размером нескольких зерен конструкционного материала). Вследствие неоднородного напряженного состояния материала диссипативные свойства его локальных объемов характеризуются статистическим распределением, что проявляется в изменении угла сдвига фаз при перемещении зоны контактного взаимодействия на поверхности объекта измерения. По распределению амплитудной характеристики угла сдвига фаз можно судить о неоднородности рассеянной поврежденности материала, а по характеристике распределения локальной неупругости поверхностного слоя – об изменении свойств исследуемого материала при циклическом нагружении.

Для того чтобы в зоне контактного взаимодействия в материале не накапливалась дополнительная поврежденность, были определены уровни максимально допускаемых напряжений в этой зоне. По данным [19] рассчитывали перемещение  $w$  в зоне контакта, которое приравнивали к амплитудному значению микроперемещения  $|u|$  торца пьезоэлектрического стержня, при разном уровне напряжения возбуждения  $U_{\text{вх}}$ :

$$|u| = 4d_{31} \Phi_0 Q l / \pi h, \quad (2)$$

где  $d_{31}$  – пьезомодуль;  $\Phi_0$  – электрический потенциал;  $Q$  – добротность;  $l$  – длина стержня;  $h$  – половина толщины стержня.

Результаты вычислений следующие: при входном напряжении  $U_{вх} = 0,5; 1,0; 1,5; 2,0$  В значение  $|u|$  соответственно составляет  $0,10; 0,18; 0,29; 0,37$  мкм. Добротность  $Q$  в формуле (2) находили по методу кривой резонанса для ненагруженной колебательной системы (рис. 1) при заданных значениях амплитуды напряжения возбуждения  $U_{вх}$ .

Согласно данной методике схема нагружения реализуется в виде пульсирующего цикла, т.е. без отрыва в зоне контактного взаимодействия торцевой поверхности с поверхностью исследуемого материала. Чтобы определить минимальное значение усилия сжатия  $P$ , которое возникает в зоне контакта, использовали решение задачи Герца [20]. Известное микроперемещение  $|u|$  торца пьезоэлектрического стержня приравнивали к перемещению в зоне контакта  $w$  (рис. 3). Искомое значение  $P$  находили по формуле

$$P = \frac{0,424}{k_1 + k_2} \sqrt{w^3 r R}, \quad (3)$$

где  $k_1, k_2$  – постоянные, учитывающие упругие свойства контактирующих материалов;  $R, r$  – радиусы поверхностей контакта соответственно торцевой пьезоэлектрического стержня и образца.

По известному значению усилия сжатия можно найти напряжение в зоне контакта:

$$\sigma = 0,135 \sqrt[3]{\frac{P(r+R)^2}{(k_1+k_2)^2 r^2 R^2} \left[ \frac{1-2\nu}{2} + \frac{2}{9}(1+\nu)\sqrt{2(1+\nu)} \right]}, \quad (4)$$

где  $\nu$  – коэффициент Пуассона материала образца.

В таблице приведены расчетные данные для сплавов АМг6Н и ОТ4-1. Для определения диапазона допускаемых усилий сжатия в зоне контактного взаимодействия торцевой поверхности с поверхностью исследуемого материала, при котором будет обеспечена линейность характеристик колебательной системы, строили графики изменения выходного напряжения  $U_{вых}$  в зависимости от статической нагрузки  $P$  (рис. 4) при постоянной резонансной частоте колебательной системы. Из полученных результатов (рис. 4) следует, что линейность характеристик колебательной системы в зависимости от амплитуды выходного напряжения сохраняется при значениях  $P$ , равных  $0,1...1,6$  Н для титанового сплава, что соответствует напряжениям в зоне контакта  $118...298$  МПа, где минимальное значение допускаемого напряжения составляет 35% предела выносливости, максимальное – 83% (предел выносливости равен 360 МПа на базе  $10^7$  цикл) [21]. Для сплава АМг6Н диапазон допускаемых усилий сжатия составляет  $0,1...0,6$  Н, соответствующий диапазон напряжений в зоне контакта –  $95...172$  МПа. Минимальное значение допускаемого усилия сжатия равно 62% предела выносливости, максимальное – 130% (предел выносливости составляет 152 МПа на базе  $2 \cdot 10^7$  цикл) [21]. Значит, максимальное допускаемое напряжение в зоне контактного

взаимодействия для данного сплава ограничено пределом выносливости. На рис. 5 показано изменение резонансной частоты колебательной системы при нагружении. В диапазоне установленных допустимых усилий сжатия сохраняется линейность амплитудных характеристик выходного напряжения  $U_{\text{вых}}$  и резонансной частоты  $f_p$ .

#### Характеристики нагружения исследуемых сплавов

Сплавы	$w$ , мкм	$P$ , Н	$\sigma$ , МПа
АМг6Н	0,10	0,10	95
	0,18	0,24	127
	0,29	0,49	161
	0,37	0,71	182
ОТ4-1	0,10	0,13	129
	0,18	0,33	173
	0,29	0,67	220
	0,37	0,97	249

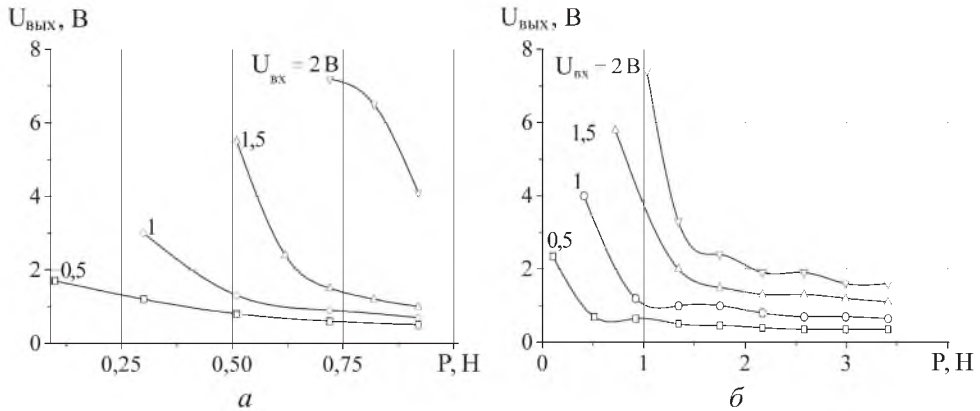


Рис. 4. Характеристики линейности колебательной системы по амплитуде при резонансной частоте колебательной системы для сплавов АМг6Н (а) и ОТ4-1 (б).

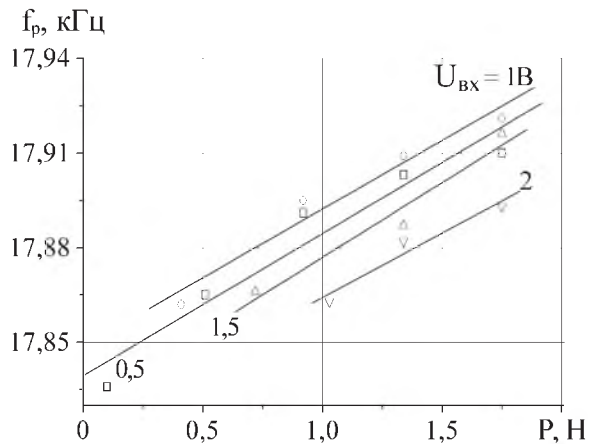


Рис. 5. Изменение резонансной частоты колебательной системы при нагружении.

Объектом исследования служили образцы из алюминиевого сплава АМг6Н цилиндрической формы. Характерной особенностью материалов данного класса является то, что в условиях циклического нагружения уровень неупругих деформаций незначителен. Это не позволяет при напряжении предела выносливости и ниже в полной мере отследить кинетику неупругости исследуемого материала с помощью существующих методов контроля неупругости.

Образцы испытывали на базе  $10^8$  цикл с частотой нагружения 17 кГц при симметричном цикле нагружения. Амплитуда напряжений составляла 34...48 МПа, что соответствует 22...31% предела выносливости. Зоны контактного взаимодействия располагались равномерно по цилиндрической поверхности исследуемого образца в плоскости, перпендикулярной оси образца, что соответствует сечению, где действуют максимальные циклические напряжения. Диаметр зоны контакта в зависимости от усилия сжатия и амплитуды входного напряжения силовозбудителя при диаметрах торцевой поверхности 5,8 мм и образца 7,5 мм равен 24...52 мкм. Средний размер зерна данного сплава достигает 600 мкм. Количество измерений точек на поверхности образца составляет около 70 значений. Учет размера зерна и количества измерений точек показывают, что на одно зерно приходится в среднем два измерения. Соотношение между размером зерна исследуемого материала и диаметром зоны контакта (степень локализации) находится в пределах порядка, но не оказывает большого влияния на изменение среднего значения угла сдвига фаз, измеренного в зоне контакта на поверхности исследуемого образца, что обусловлено особенностями протекания процесса микропластического деформирования поликристаллического материала [22]. Следовательно, измеренное значение угла сдвига фаз может быть принято в качестве характеристики, интегрально отражающей неоднородность пластического деформирования зерна.

В каждой контактной зоне с помощью ПЭВМ и разработанной системы АЦП\* регистрировали усредненную по 300 точкам величину угла сдвига фаз. Для осреднения данных измерений в 70 точках на поверхности исследуемого образца использовали около 21000 значений угла сдвига фаз. Оценка погрешности измерений свидетельствует, что погрешность аппаратуры колеблется в пределах 5%, общая погрешность измерений составляет 10%. С использованием базы данных измерений характеристику неупругости представляли в координатах нормированная (по отношению к максимальному значению) дисперсия угла сдвига фаз – долговечность, по кинетике которой можно судить об изменении структуры микропластических деформаций в материале при циклическом нагружении (рис. 6).

Первый период нагружения (примерно 50% долговечности) характеризуется снижением кинетической характеристики в результате однородного распределения очагов микропластической деформации по отношению к начальному состоянию (рис. 6,а). Для второго периода (50...60% долговечности) характерен ее минимум, что обусловлено стабилизацией процесса микропластического деформирования. Последний период нагружения (до зарож-

\* Система разработана П. М. Копчевским.

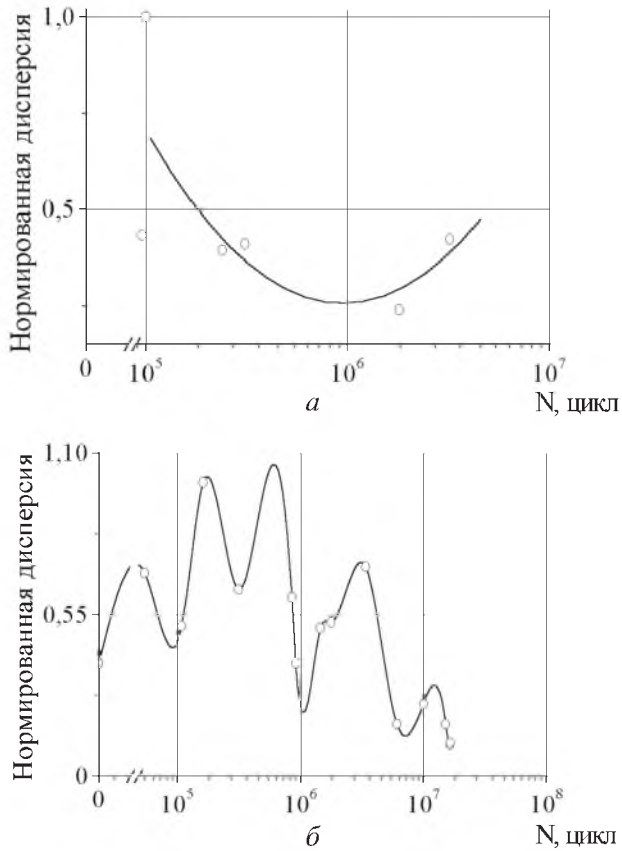


Рис. 6. Кинетические характеристики сплавов АМг6Н (а) и ВТ14 (б).

дения макротрещины) связан с локализацией процесса микропластического деформирования, о чем свидетельствует наличие возрастающего участка на зависимости, приведенной на рис. 6,а. Отмеченные периоды соответствуют стадийности процесса усталостного повреждения, описанного в работе [7], где в качестве параметра усталостного повреждения используется неупругая деформация за цикл, изменение которой отображают структурные преобразования в материале. На рис. 6,б представлена кинетическая характеристика сплава ВТ14 [23], общая тенденция изменения которой такая же, как и сплава АМг6Н. Исключение составляет то, что в пределах 40%-ной наработки наблюдаются отдельные осцилляции, появление которых имеет периодичный характер. Это служит подтверждением того, что метод чувствителен к дискретным структурным изменениям в материале.

## Выводы

1. Предложен метод, позволяющий контролировать кинетику неупругости материала по изменению угла сдвига фаз между напряжением и деформацией в локальной нагруженной зоне его поверхности, а разработанная методика – изменения структуры нагруженного поликристаллического материала при долговечности до  $10^8$  цикл по разбросу значений угла сдвига фаз.



2. Получены характеристики изменения неупругости для сплава АМг6Н, которые описывают его повреждаемость в диапазоне долговечности до  $10^8$  цикл в условиях циклического нагружения при частоте 17 кГц.

## Резюме

Запропоновано метод, що дозволяє контролювати кінетику неупругості полікристалічного матеріалу за зміною кута зсуву фаз між напруженням і деформацією в локально навантаженій зоні поверхні досліджуваного матеріалу. За допомогою метода можна визначити поточне значення пошкодження досліджуваного алюмінієвого сплаву в умовах лабораторних випробувань при циклічному навантаженні за зміною статистичних характеристик розподілу кута зсуву фаз. Досліджуваним матеріалом служив алюмінієвий сплав АМг6Н, який відноситься до циклічно зміцнених матеріалів.

1. *Сопrotивление* материалов деформированию и разрушению / Под ред. В. Т. Троценко. – Киев: Наук. думка, 1994. – Ч. 2. – 700 с.
2. Гурьев А. В., Митин В. Я. Особенности развития локальных микро-неоднородных деформаций и накопление усталостных повреждений в углеродистых сталях // Пробл. прочности. – 1978. – № 11. – С. 19 – 23.
3. Гурьев А. В., Савкин А. Н. О влиянии кратковременных циклических перегрузок на усталостную прочность и демпфирующую способность углеродистых сталей // Там же. – 1978. – № 7. – С. 17 – 22.
4. Белугина Е. А., Попов С. И., Худякова Н. А. Неоднородность распределения остаточных микродеформаций при циклическом деформировании // Там же. – 1982. – № 7. – С. 34 – 36.
5. Троценко В. Т. Рассеянное усталостное повреждение металлов и сплавов. Сообщ. 1. Неупругость, методы, результаты исследования // Там же. – 2005. – № 4. – С. 5 – 32.
6. Троценко В. Т. Деформирование и разрушение металлов при многоцикловом нагружении. – Киев: Наук. думка, 1981. – 343 с.
7. *Циклические деформации и усталость металлов*. В 2 т. Т. 1. Малоцикловая и многоцикловая усталость металлов / В. Т. Троценко, Л. А. Хамаза, В. В. Покровский и др. / Под ред. В. Т. Троценко. – Киев: Наук. думка, 1985. – 216 с.
8. Серенсен С. В. Сопrotивление материалов усталостному и хрупкому разрушению. – М.: Атомиздат, 1975. – 192 с.
9. Кузьменко В. А., Сулик И. С., Шевчук А. Д. К вопросу об определении рассеяния энергии в металлах при высокочастотных колебаниях с большой амплитудой // Рассеяние энергии при колебаниях механических систем. – Киев: Наук. думка, 1968. – С. 266 – 272.
10. Троценко В. Т. Усталость и неупругость. – Киев: Наук. думка, 1971. – 267 с.
11. Писаренко Г. С. Рассеяние энергии при механических колебаниях. – Киев: Изд-во АН УССР, 1962. – 436 с.

12. *Lazan B. J.* Fatigue of structure materials at high temperature // Proc. Int. Conf. Fatigue Metals. – London, 1956. – P. 327 – 340.
13. *Сорокин Е. С.* Методы экспериментального определения внутреннего трения в твердых телах // Вопр. прикл. механики. – 1964. – Вып. 193. – С. 5 – 42.
14. *Иванова В. С.* Синергетика разрушения и механические свойства // Синергетика и усталостное разрушение металлов. – М.: Наука, 1989. – С. 6 – 29.
15. *Quimby S. L.* On the experimental determination of the viscosity of vibrating solids // Phys. Rev. – 1925. – 25, No. 4. – P. 558–573.
16. *Мезон У.* Измерение низко- и высокоамплитудного внутреннего трения в твердых телах и их связь с движением несовершенств строения // Микропластичность. – М.: Металлургия, 1972. – С. 236 – 301.
17. Пат. № 17348 Україна МПК (2006) G01N 3/00. Спосіб оцінки рівня деградації матеріалу елемента конструкції / Г. Г. Писаренко, П. М. Копчевський, А. М. Майло. – Чинний від 15.09.06.
18. *Писаренко Г. С., Яковлев А. П., Матвеев В. В.* Вибропоглощающие свойства конструкционных материалов. – Киев: Наук. думка, 1971. – 375 с.
19. *Писаренко Г. Г.* Прочность пьезокерамики. – Киев: Наук. думка, 1987. – 232 с.
20. *Тимошенко С. П., Гудьер Дж.* Теория упругости. – М.: Наука, 1975. – 576 с.
21. *Титановые сплавы в машиностроении* / Под ред. Г. И. Капырина. – Л.: Машиностроение, 1977. – 170 с.
22. *Кукса Л. В.* Закономерности развития микронеоднородной пластической деформации металлов // Пробл. прочности. – 1979. – № 9. – С. 13 – 19.
23. *Писаренко Г. Г., Войналович О. В., Голованьов Ю. М., Василюк І. М.* Пошкоджувальність та структурна неоднорідність титанового сплаву ВТ14 при циклічному навантажуванні // Там же. – 2003. – № 6. – С. 75 – 84.

Поступила 09. 10. 2007