

ПРОГНОЗИРОВАНИЕ ВРЕМЕНИ РАЗРУШЕНИЯ ОТДЕЛЬНЫХ КОНСТРУКЦИОННЫХ ДЕТАЛЕЙ СЛОЖНОЙ МЕХАНИЧЕСКОЙ СИСТЕМЫ

Белорусский национальный технический университет

г. Минск, Беларусь

1. Введение

В современных условиях сложные механические системы используются во всех сферах человеческой деятельности. Отдельные конструкционные элементы и системы в целом работают в сложных условиях механического нагружения, высоких и низких температур, высоких и низких давлений достаточно длительное время. Такие экстремальные условия их эксплуатации требуют обеспечить надежную безопасность. Возникла необходимость прогнозировать изменение прочности накануне выхода из строя отдельных элементов сложной конструкции. В этом направлении используются различные методы непрерывной безразборной технической диагностики. Широкое распространение получили методы акустической эмиссии [1, 2] и электромагнитного излучения в различных длинах волн [3, 4]. Непосредственно для прогнозирования выхода из строя деталей сложных конструкций с использованием акустической эмиссии в непрерывном режиме рассмотрено в [5], а в импульсном режиме в [6]. Использование радиошума, генерируемого сложной механической системой, для целей прогнозирования надежности работы отдельных ее узлов рассмотрено в [7]. Проведенные исследования показали, что принципиально возможно осуществить прогнозирование выхода из строя определенных узлов сложной технической системы. Однако для осуществления такого прогноза необходимо разработать в каждом конкретном случае физическую модель изменения структуры и дефектообразования, которые определяют длительность прочности работы той или иной детали в заданных условиях эксплуатации. Ниже рассмотрим, какие могут возникать изменения структуры твердого тела под действием механических и тепловых нагрузок и как эти изменения использовать для прогнозирования предельной прочности деталей машин.

2. Структура и механические свойства твердых тел

Все конструкционные материалы являются композиционными. Механические свойства таких материалов достаточно своеобразны. Они обладают высокими прочностными свойствами, высокой пластичностью, низкой износостойкостью и некоторые из них обладают весьма интересным свойством — эффектом памяти формы.

Композиционные материалы формируются трех типов: аморфные, смесевые и эвтектические. Аморфные композиционные материалы представляют собой хаотическое распределение решеточных кластерных структур разных веществ друг относительно друга. Взаимодействие между такими кластерными структурами осуществляется только ковалентной связью. При разогреве такого материала энергия тратится только на возбуждение колебаний и разрыв связей для каждого вещества в отдельности, а на разрыв связей между разнородными кластерами энергия практически не потребляется.

Смесевые композиционные материалы представляют собой систему независимых кластерных решеточных структур, которые вставлены друг в друга, а взаимодействие между ними осуществляется путем ковалентной связи между кластерами разных веществ и адгезионное взаимодействие между атомами контактирующих поверхностей разнородных кластеров. Ярким представителем такого композиционного материала является никелид титана. Вследствие взаимодействия разных кластерных решеточных структур возникает их деформация. В никелиде титана кластерная решеточная структура никеля сильно деформирована и эта деформация в свою очередь оказывает влияние на решеточную структуру титана.

Эвтектические композиционные материалы — это единая кристаллическая структура, формируемая кластерами, состоящими из атомов разнородных веществ, которые образуют общую кластерную кристаллическую структуру с ковалентной и обменной энергиями связи.

Расчетные значения энергий связи атомов внутри кластера и межкластерного взаимодействия для ряда элементов и их смесей приведены в табл. 1

Таблица 1.

Энергия бинарной связи атомов внутри кластера и межкластерного взаимодействия для никеля, титана, железа и их смесей в эВ, а также их теплоемкостей в кал/град.моль

Параметры	Вещество									
	Никель		Титан		Железо		Никелид титана		Никелид железа	
	0 K	298 K	0 K	298 K	0 K	298 K	0 K	298 K	0 K	298 K
$E_{св.1}$	0,277	0,276	0,307	0,306	0,367	0,366	0,148	-	0,575	0,574
$E_{св.2}$	0,149	0,148	0,169	0,168	0,156	0,156	0,066	-	0,274	0,274
$E_{св.3}$	0,062	0,056	0,044	0,032	0,102	0,101	0,044	-	0,065	0,060
$E_{св.св}$	0,059	0,054	0,109	0,108	0,013	0,003	0,096	-	0,070	0,069
C_V	-	0,699	-	1,207	-	0,288	-	2,298	-	1,540
$E_{св.св}$	5,050	4,376	6,090	4,857	4,299	4,189	-	2,879	7,033	6,102

Из табл. 1 следует, что никелид титана не может быть сформирован путем образования единой кластерной решеточной структуры. В разогретой жидкости титана с никелем в равной пропорции по мере остывания начнет вначале формироваться кри-

сталлическая структура титана, а затем никеля. Только после формирования кластеров титана и никеля со второй координационной сферой начнут образовываться бинарные структуры титана с никелем. Преимущественно это будет происходить в местах спайности между кластерами никеля и титана, т.е. начнет формироваться третья координационная сфера, обеспечивая взаимную связь между этими кластерами. Решеточная структура никеля будет деформирована до размеров решеточной структуры титана.

В нормальных условиях для никеля при усреднении по температуре 0,28 К получаем значение теплоемкости 6,210 кал./град.моль, а для титана при усреднении по температуре 0,373 К — 6.010 кал./град.моль. Полученные значения теплоемкостей в указанных условиях соответствуют экспериментальным данным. Если сравнивать теплоемкости титана и никеля между собой, то следует производить такое сравнение при одинаковых значениях изменения температуры. Так в нормальных условиях при изменении температуры в $\Delta T = 0,01 \cdot T$ для никеля получаем значение теплоемкости 0,699 кал/град.моль, а для титана — 1,207 кал/град.моль. Если бы формирование никелида титана происходило в виде единой кристаллической структуры, т.е. в виде эвтектической смеси, то теплоемкость такой смеси была бы 2,3 кал/град.моль. Реально этого не происходит. Эвтектическая смесь образуется никеля с железом. Смесь железа с никелем в процентном соотношении $Fe + 36,1\%Ni$ получила название инвар.

Для инвара в нормальных условиях теплоемкость при изменении температуры на $\Delta T = 0,01 \cdot T$ составляет 1,540 кал/град.моль. Теплоемкость эвтектической смеси заметно превосходит теплоемкость исходных веществ.

На микроуровне следует рассматривать формирование кластеров для каждого материала композиционного материала в отдельности. Результаты расчета энергий связи бинарного взаимодействия внутри основного кластера и основного кластера с частицами второй и третьей координационных сфер приведены в табл. 2

Таблица 2.

Эффективный заряд первой, второй и третьей степени ионизации и энергия бинарного взаимодействия частиц основного кластера и основного кластера с частицами второй и третьей координационных сфер, а также межкластерного взаимодействия чистых веществ

Вещество	Параметры								
	Эффективный заряд			Энергия связи, эВ			Кластеры		
	I-я	II-я	III-я	I-й	II-й	III-й	Z'	E _{св} , эВ	Размер, нм
Ti	0,945	0,691	2,214	0,309	0,168	0,055	0,451	0,108	0,82
Ni	0,855	1,877	1,796	0,272	0,148	0,071	0,213	0,054	0,71

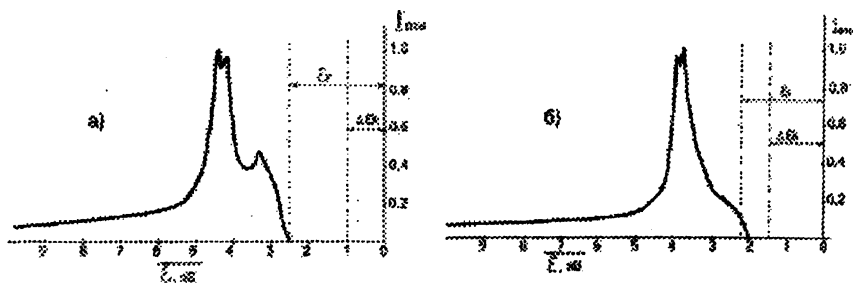


Рис. 1. Распределение электронной плотности внутри первой зоны Бриллюэна для титана (а) и никеля (б).

Смещение границы энергии ионизации соответственно для титана и никеля составляет: 1,042 и 1,387 эВ. Валентная зона значительно уширена (для титана — полуширина 8,013 эВ, а для никеля — 7,244 эВ. В соответствии с этими данными получено распределение электронной плотности для первой зоны Бриллюэна. Результаты расчета для обоих веществ приведены на рис. 1 (а и б).

Как формируется композит, следует из эффекта Чохральского. Из расплава вначале формируются кластеры одного из веществ. Обычно это вещества, у которых максимальная энергия связи частиц основного кластера. В случае расплава Ti и Ni максимальная энергия связи частиц основного кластера у титана. Поэтому вначале по мере снижения температуры расплава начинается рост основного кластера Ti . Основные кластеры Ti вытесняют атомы никеля, которые прекращают доступ атомам Ti для дальнейшего роста кластера с образованием второй и третьей координационных сфер. Избыток атомов никеля в межкластерном объеме Ti приводит к росту основного кластера Ni . В дальнейшем последовательно формируется вокруг основного кластера второй координационный слой у Ti , затем у Ni второй и третий координационные слои и только в последнюю очередь третий координационный слой у основного кластера Ti . В результате происходит послойное образование решеточной структуры кластеров титана и никеля последовательно слой за слоем и они как бы встроены друг в друга. Проникновение одной решетки кластера в другую происходит на один монослой атомов никеля. Поэтому межкластерные пустоты титана являются свободными, и это обстоятельство не является препятствием для осуществления обменного взаимодействия между кластерами.

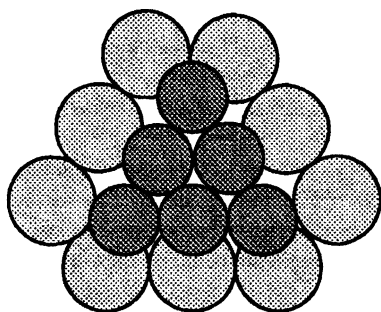


Рис. 2. Кластер никеля над межкластерным объемом титана.

Энергия ковалентной связи между кластерами решеток титана и никеля с учетом ближайшего окружения составляет не более $4 \cdot 10^{-4}$ эВ. Следовательно, взаимодействие валентных электронов с их распределением по энергиям в первой зоне Бриллюэна можно не учитывать. При непосредственном расположении разнородных кластеров следует учитывать возникновение связи обусловленной обменной энергией между энергетическими уровнями второй, третьей и т.д. степенями ионизации соприкасающихся атомов. В никелиде титана в непосредственном соприкосновении находятся три пары атомов, как это показано на рис. 2. Для второй и третьей кратности ионизации энергия бинарной связи между кластерами никеля и титана составляет: 0,530 эВ.

Из рис. 2 следует, что при скольжении по местам спайности кластеров титана и никеля без затраты работы на их смещение деформация может составлять 29%. При деформациях менее 29% следует рассматривать только растяжение или сжатие кластерных решеток никеля и титана. Так как кластеры никеля находятся в межкластерных объемах титана, то расстояние между ними составляет три диаметра титана. На таком удалении кластеры никеля взаимодействуют друг с другом с энергией 0,0592 эВ. Это несколько больше, чем для кластеров титана. Упругая деформация для кластерной решетки никеля в смеси *Ti* и *Ni* возникает в пределах деформаций до 11,8%. Получается, что кластерные решетки титана и никеля обладают разными деформационными свойствами. Полученные результаты подтверждаются опытными данными работы [8].

При циклическом нагружении некоторые композиционные материалы должны обладать гистерезисом [9, 10]. Обычно это материалы, обладающие памятью формы. При растяжении в межкластерных объемах в направлении действия силы увеличивается число атомов, обеспечивающих обменное взаимодействие между кластерами. По мере сжатия число свободных частиц остается постоянным, а расстояние уменьшается. Энергия связи возрастает. При сжатии до начального равновесного значения образца напряжение не возвращается к исходному значению, равному нулю. Необходимо совершить дополнительную работу по преодолению накопленной энергии при растяжении образца. При импульсных нагрузках большинство материалов должны обладать гистерезисом.

Таким образом, механические свойства твердых тел определяются межкластерным взаимодействием, которое обусловлено ковалентной связью между кластерами и энергией возникающей при обмене свободными атомами, находящимися внутри межкластерного объема. Модуль Юнга зависит от условий определения этой физической величины — температуры окружающей среды и приложенной внешней нагрузки, т.е. величины деформации.

Упругие свойства твердого тела реализуются до момента, когда при некоторой деформации возникает равенство энергии межкластерной связи и энергии поступа-

тельного движения свободных частиц внутри межкластерного объема при заданной температуре.

Пластические свойства проявляются резко, а именно, когда энергия межкластерного взаимодействия равна энергии поступательного движения свободных частиц внутри межкластерного объема. В ряде случаев некоторое возрастание напряжения с ростом пластической деформации обусловлено возникновением упрочненного слоя вблизи поверхности образца и увеличением количества свободных частиц внутри межкластерного объема.

В композиционных материалах возникают решеточные кластерные структуры, встроенные друг в друга. Механические свойства обусловлены совместным влиянием всех решеточных кластерных структур. Упругие свойства композиционных материалов реализуются в достаточно большой области деформаций. Такие материалы обладают памятью формы и гистерезисом диаграммы «напряжение-деформация».

3. Механизм разрушения под влиянием механических и тепловых нагрузок

Рассмотрим механизм разрушения на примере эвтектической смеси Fe-Ni и смешанном композиционном материале никелиде титана. Потенциал межкластерного взаимодействия эвтектической смеси Fe-Ni приведен на рис. 3. На рис. 3 симметричная часть потенциала взаимодействия выделена вертикальными пунктирными линиями. Квадратичная зависимость потенциала взаимодействия выделена более жирной пунктирной линией. Область упругой деформации для такой эвтектической смеси составляет ~0,85%. Область нелинейной упругой деформации простирается до ~5%. Модуль Юнга в области упругой деформации $4,64 \cdot 10^{10}$ Па. Это значение меньше, чем у железа и у никеля в отдельности.

Диаграмма времени пребывания валентных электронов вблизи атома железа и никеля приведена на рис. 4. Электроотрицательность у никеля больше, чем у железа. Поэтому вблизи ядра атома никеля некоторое время пребывают оба валентных электрона атомов никеля и железа, т.е. никелид железа обладает некоторой долей ионной связи. Эта доля составляет 0,5%. Уширение основного состояния железа будет определяться не временем одного оборота собственного валентного электрона, а временем одного оборота валентного электрона вокруг ядра атома никеля. Это было учтено при расчетах энергий связи частиц внутри кластера никелида железа и при расчетах межкластерного взаимодействия. Разность времен оборота валентного электрона вокруг атома никеля и атома железа составляет ~3%. Если эту разность в процентах умножить на вероятность обмена валентными электронами, т.е. на величину интеграла перекрытия, то получим значение доли ионной связи между атомами железа и никеля. В результате получаем значение 0,434%. Таким образом, эмпирический метод учета доли ионной связи, предложенный Л. Полингом, заменяется конкретным расчетом бинарного взаимодействия между разнородными атомами.

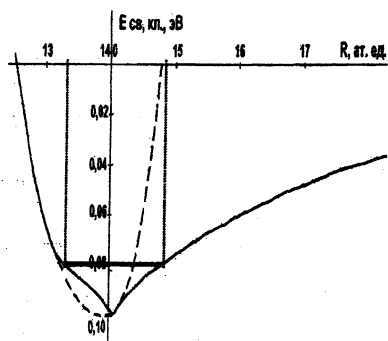


Рис. 3. Потенциал межкластерного взаимодействия для эвтектической смеси Fe-Ni в точке эвтектики. Масштаб по оси ординат в два раза меньше.

Для эвтектического никелида железа точка плавления соответствует 1490 К. Это точка эвтектики. При этой температуре энергия межкластерного взаимодействия скачком уменьшается и становится меньше энергии поступательного движения свободных атомов железа в межкластерном объеме. При столкновении таких частиц с кластером происходит разрыв кластерной решеточной структуры. Энергия связи на один атом для эвтектической смеси составляет 4,746 эВ, тогда как для чистого железа при этой температуре энергия связи всего лишь 3,178 эВ. Для эвтектического состояния характерно, что основной кластер формируется атомами никеля вокруг атома железа,

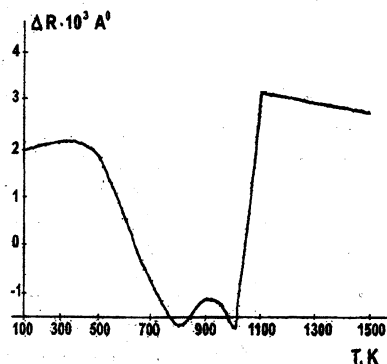


Рис. 5. Зависимость от температуры изменения межкластерного расстояния для инвара.

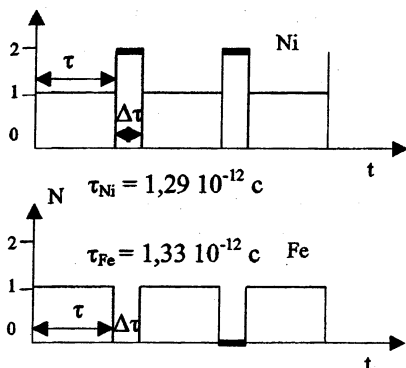


Рис. 4. Диаграмма времени пребывания валентных электронов у атомов никеля и железа.

а остальные координационные слои формируются атомами железа. Зная точку эвтектики, можно получить зависимость межкластерного расстояния от температуры. Результаты расчета приведены на рис. 5.

Получается, что инвар до температуры ~ 400 К расширяется, а при дальнейшем повышении температуры сжимается. В области температур 1000-1100 К происходит резкое расширение и затем вновь постепенно сужается. Поэтому в справочниках коэффициент линейного расширения для инвара приводится только для области температур 273–293 К и примерно оценивается в $0,9 \cdot 10^{-6}$ град⁻¹. Расчетный средний коэффициент линейного

расширения для инвара в области температур 273–400 К составляет $1,9 \cdot 10^{-6}$ град⁻¹. Такое поведение инвара трудно понять.

Смесь титана с никелем не образует эвтектическую смесь, так как оба вещества обладают сходной кристаллической структурой. Модельное представление деформации кластерных решеток для различных материалов приведено на рис. 6.

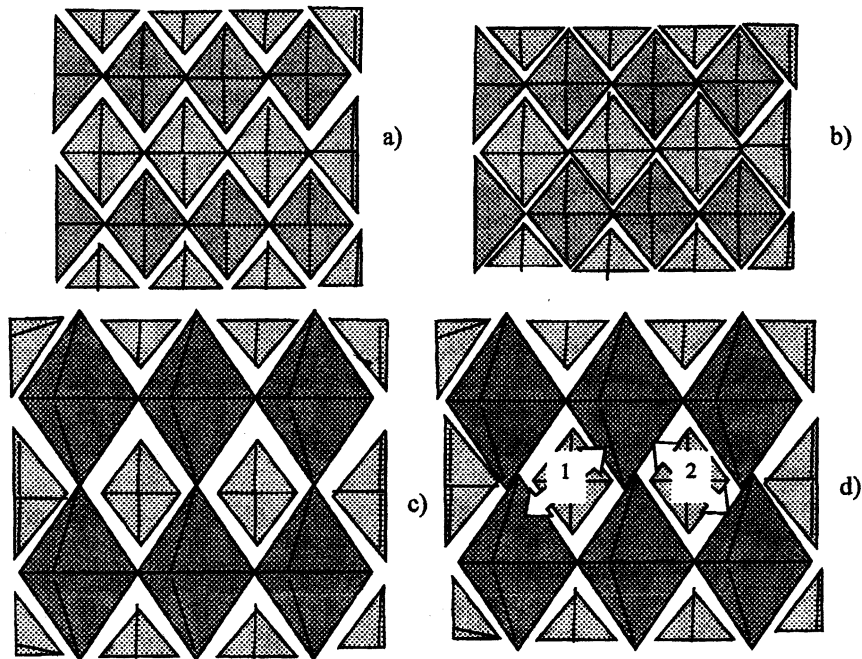


Рис. 6. Общий вид модели кластерной решеточной структуры:

- a) монокристаллов и эвтектической смеси в точке эвтектики;
 - b) композиционных материалов смешесвых и эвтектических вдали от точки эвтектики
- Общий вид деформированной решеточной структуры:
- c) монокристаллов и эвтектической смеси в точке эвтектики;
 - d) композиционных материалов смешесвых и эвтектических вдали от точки эвтектики.

Деформация твердых тел определяется в основном изменением кластерной решеточной структуры под влиянием внешнего воздействия начиная с поверхности. При растяжении композиционного материала смешесвого и эвтектического вдали от точки эвтектики будет происходить смещение кластеров вдоль плоскостей таким образом, что произойдет сжатие вдоль стрелки, отмеченной цифрой 1 (рис. 6). При сжатии в том же направлении скольжение кластеров будет происходить по другим

плоскостям так, что вызовет смещение кластеров по стрелке, отмеченной цифрой 2. В первоначальную точку такой композиционный материал не возвратится путем сжатия. Возникнет гистерезис.

Если композиционный материал, обладающий памятью формы, растянуть в одном направлении, а затем сжать в перпендикулярном направлении, то первоначальная форма должна восстановиться. Если такой материал разогреть, то колебания кластеров малого размера будут способствовать ликвидации напряженного состояния, возникающего по стрелке 1 или по стрелке 2 (рис. 6 d). При этом может полностью восстановиться первоначальная форма тела, т.е. тело возвратится в исходное состояние. При циклическом сжатии-растяжении этого не произойдет.

Монокристаллы и эвтектические композиционные материалы в точке эвтектики ведут себя несколько иначе. При растяжении происходит сжатие поверхностного слоя, а при сжатии тот же поверхностный слой по-прежнему сжимается. Циклическое повторение этого процесса даже при малых нагрузках после определенного цикла приведет к разрушению ранее упроченного поверхностного слоя. Исходя из потенциала взаимодействия кластеров, разрушение приповерхностного слоя будет носить взрывной характер, аналогично тому, как это имеет место вследствие превращения белого олова в серое. Конструкционный материал должен постепенно рассыпаться в образовавшейся «шейке».

Интересно отметить следующий факт. Механические свойства кластерных решеток большинства веществ определяются обменным взаимодействием свободных атомов в межкластерном объеме. Если такой конструкционный материал поместить в вакуум, то вследствие газификации количество свободных атомов в межкластерном объеме резко уменьшится и, естественно, уменьшится энергия связи между кластерами. В результате механические свойства резко снизятся, и это может привести к взрывному разрушению при сравнительно малых внешних нагрузках и внешне неизменной форме конструкционного материала. Эта ситуация проявилась при разрушении космического корабля многоразового использования «Шаттл», когда он взорвался при вхождении в плотные слои атмосферы, побывав длительное время в космосе. Двухчастичная квантовая модель твердого тела позволяет проводить компьютерное моделирование с прогнозом возможных последствий при известном составе конструкционного материала и условии его эксплуатации. Со временем такие прогнозы следует повсеместно реализовать, особенно в строительстве и транспорте.

Если какой-то элемент сложной конструкции обладает резонансными свойствами, то такой элемент способен возбуждаться на любой частоте. Резонансная частота колебаний определяется по формуле:

$$\omega_0 = \sqrt{\frac{k}{m}}, \quad (1)$$

где k — коэффициент упругости, и m — масса элемента конструкции.

Коэффициент упругости определяется из вида потенциала взаимодействия (рис. 3), а именно:

$$k = \frac{E(R_0) - E(R)}{|R - R_0|^2} . \quad (2)$$

Здесь R_0 — равновесное межкластерное расстояние.

Из рис. 3 следует, что коэффициент упругости резко уменьшается как с повышением температуры, так и с ростом внешних механических нагрузок. В области упругой линейной деформации частота возбужденных колебаний не изменяется, а при нелинейной упругой деформации частота уменьшается. Если деталь изготовлена из композиционного материала, то ситуация может оказаться обратной. С повышением механических и тепловых нагрузок частота колебаний наоборот может возрасти для таких деталей за счет упрочнения приповерхностных слоев при внешнем нагружении. С ростом температуры происходит упрочнение конструкционного материала по всему объему, так как возрастает обменное взаимодействие между кластерами. Это обусловлено увеличением частоты обмена свободными атомами в межкластерных пустотах. Смещение частоты упругих колебаний в область высоких частот накануне разрушения образца было замечено в [6], а в работе [7] накануне разрушения наблюдалось увеличение частоты вращения вала компрессора и турбины высокого, а также низкого давления. Такое явление возникает при наличии в системе положительной обратной связи.

Итак, резкое изменение частоты возбуждаемых колебаний свидетельствует о том, что сложная механическая система находится в условиях нарушения синергетических связей, а это не допустимо. Рассмотрим, как конкретно осуществляется анализ нарушения синергетических связей.

4. Методы анализа нарушения синергетических связей

4.1. Акустическая эмиссия в сложной механической системе может возникать под влиянием внешнего воздействия или вследствие наличия в ней вращающихся (колеблющихся) элементов конструкции. Источник внутренних колебаний возбуждает все элементы сложной конструкции. В результате их взаимного наложения в системе возникают волны сложного амплитудного и фазово-частотного сигнала. Наличие разного рода модуляций, внешних и внутренних шумов не детерминированной природы приводит к существенному искажению регистрируемого сигнала. Анализировать такой сигнал, который описывается случайной функциональной зависимостью, достаточно сложно. Однако это возможно, если применить корреляционный анализ случайных процессов. Для этого случайный процесс разобьем на отдельные полосы анализа, и в каждой из этих полос будем считать, что внутренние и внешние

модуляционные воздействия детерминированные, но в свою очередь подвержены амплитудной и фазово-частотной модуляцией. Это соответствует случаю, когда сложная механическая система содержит несколько однородных элементов, обладающих разными резонансными частотами. Тогда результирующий сигнал представится в виде:

$$S(t) = \sum_{k=1}^K U_{m,k} \left[1 + \sum_{i=1}^{N_k} M_k \alpha_{k,i} \cos(\Omega_{k,i} t + \Phi_{k,i}) \right] \cos(\omega_{0,k} t + \xi_k \int_{-\infty}^t s_k(\tau) d\tau + \Phi_k(t)t). \quad (3)$$

Здесь суммирование по k есть результат сложения однотональных сигналов с амплитудной, фазовой и частотной модуляцией, а суммирование по i — результат многотональной модуляции исходного однотонального сигнала. При многотональной амплитудной модуляции возникает спектр комбинационных частот относительно $\omega_{0,k}$ со своими амплитудами, которые определяются парциальными коэффициентами модуляции $\alpha_{k,i}$. Если с частотой $\Omega_{k,i}$ происходит импульсная модуляция, то спектр комбинационных частот будет непрерывным и ширина каждой частоты $\Omega_{k,i}$ будет определяться длительностью воздействующего импульса. Аналогичная ситуация имеет место при фазовой и частотной модуляциях.

Чтобы понять методику анализа сигнала, определяемого по формуле (3), рассмотрим конкретный пример работы компрессора турбореактивного двигателя типа Д-30 II серии. Компрессор низкого давления находится на одном валу с турбиной низкого давления, а компрессор высокого давления связан одним валом с турбиной высокого давления. Такая система образует два каскада. Первый каскад низкого и второй каскад высокого давления. Оба каскада вращаются каждый со своей частотой. При 60%-ой работе двигателя относительно номинальной частота вращения первого каскада составляет 6000 ± 75 , а второго каскада — 10200_{-100}^{+50} об/мин [11]. Корпус двигателя наиболее эффективно возбуждается на частотах модуляции газового потока лопатками компрессора низкого давления, так как этот поток непосредственно соприкасается с его внутренней поверхностью. Модуляция обшивки корпуса двигателя газовым потоком, который движется в компрессоре высокого давления, а также в турбине высокого и низкого давления значительно ослаблена, так как эти возмущения демпфируются внутренними крепежными конструкциями двигателя. Поэтому анализ механических колебаний корпуса двигателя в области звуковых частот не позволяет в полной мере судить о техническом состоянии двигателя.

Компрессор первого каскада содержит четыре ступени, на рабочих колесах которых крепятся лопатки. Число лопаток первой ступени — 36, а четвертой — 38. Поток воздуха, поступающий в компрессор возмущается вращающимися лопатками первой, затем последовательно лопатками второй, третьей и четвертой ступенями. Каждая ступень независимо друг от друга возмущает воздушный поток своими лопатками. Схематически возмущение газового потока лопатками каждой ступени каждой трубки тока показано на рис. 7.

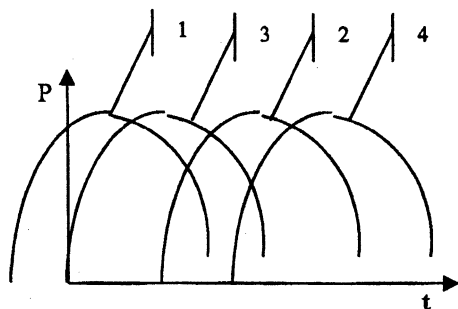


Рис. 7. Схема возмущения газового потока лопатками компрессора: 1 — первой; 2 — второй; 3 — третьей и 4 — четвертой ступенями компрессора низкого давления.

Возмущение газового потока лопатками каждой ступени разнесено по времени. В результате после первой ступени воздушный поток промодулирован частотой $f_1 = n f_0$. После второй ступени — частотой $f_2 = n f_0 + n f_0$. После третьей ступени — частотой $f_3 = n f_0 + n f_0 + n f_0$. Наконец, после четвертой ступени — частотой $f_4 = n f_0 + n f_0 + n f_0 + n f_0$. Так как число лопаток на каждой ступени разное, то после первой ступени частота модуляции одинарная, после второй ступени — может оказаться двойной, после

третьей ступени — тройной и после четвертой ступени — четвертной.

Модуляция сигнала на каждой из этих частот происходит вследствие возбуждения собственных частот колебаний каждой лопатки компрессора. Это значит, что в соответствии с (3) относительно центральных частот f_1, f_2, f_3 и f_4 симметрично должны возникать комбинационные частоты. В ряде случаев возможна однополярная амплитудная модуляция. Тогда относительно центральной частоты возникают частоты только в области низких или высоких частот. Накануне разрушения только одной из лопаток возникает дополнительная модуляция по частоте относительно четырех центральных частот.

При возникновении различных дефектов в парах трения валов первого и второго контуров возникает комбинационный спектр относительно основных частот вращения этих валов. Поэтому анализ низких частот позволяет судить о состоянии пар трения валов первого и второго контура. Естественно, такая модуляция будет проявляться и на модуляции газового потока в контурах низкого и высокого давления.

Таким образом, непрерывная техническая диагностика путем анализа звуковой эмиссии позволяет предвидеть возможность выхода из строя отдельных элементов и пар трения двигателя в области низких частот для валов первого и второго контуров, а также компрессора низкого давления в области более высоких частот. Если двигатель размещен внутри какой-то сложной механической системы, то анализируя звуковую эмиссию от отдельных виброактивных узлов возможно предвидеть выход из строя только анализируемого элемента сложной конструкции.

Анализ звуковой эмиссии в импульсном режиме позволяет предвидеть выход из строя только того элемента, который подвержен воздействию. Это значительно ограничивает область применения импульсного метода анализа. Поэтому не будем его подробно рассматривать. Более перспективным является метод, основанный на анализе радиопомех, генерируемых сложной механической системой.

4.2. Радиопумы всегда возникают при работе сложной механической системы при наличии в системе различных пар трения, электромоторов, двигателей внутреннего сгорания и др. Если в сложной механической системе имеется источник генерации электромагнитного излучения, то такое излучение промодулировано различными парами трения, механическими вращениями и колебаниями. Рассмотрим генерацию радиопума в процессе работы турбореактивного двигателя типа Д-30 П серии.

Плазменное состояние вещества является мощным источником электромагнитного излучения. Если плазма находится внутри металлического замкнутого объема, то возможны следующие причины формирования электромагнитных излучений: 1) плазменные колебания, обусловленные температурным разделением электрических зарядов на радиусе Дебая; 2) плазменные колебания двойного электрического слоя вокруг сажевых частиц и 3) плазменные колебания двойного электрического слоя у внутренней поверхности камеры сгорания.

Известно [1], что работающий двигатель является источником разделения электрических зарядов, что сопровождается генерацией радиоволн в широкой области частот. Объяснение этому факту было дано в [1,17]. Кратко рассмотрим этот механизм.

Среднеэффективная концентрация заряженных частиц в камере сгорания имеет значение $\sim 10^{18} \text{ м}^{-3}$. Температура электронного газа при ионизации отрицательных ионов угарного газа составляет 3500 К, а при термической ионизации — температуру окружающей среды. Частота плазменных колебаний

$$f = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{e^2 n_e}{\epsilon_0 m_e}} \approx 9,0 \cdot 10^9 \text{ Гц.} \quad (4)$$

Это трехсантиметровый СВЧ диапазон.

Сажевые частицы заряжаются преимущественно за счет отрицательной ионной эмиссии молекул угарного газа. Эмиссия отрицательных ионов угарного газа не создает двойного электрического слоя вокруг сажевых частиц. Положительно заряженные сажевые частицы и отрицательные ионы угарного газа равномерно распределены по всему объему камеры сгорания. Развал отрицательных ионов осуществляется за счет термоионизации и реакции соединения с кислородом окружающего воздуха. Убыль отрицательных ионов CO^- происходит в основном вследствие соединения с кислородом воздуха. Тогда

$$\frac{d[\text{CO}^-]}{dt} = k_f [\text{CO}^-][\text{O}_2], \quad (5)$$

где k_f — константа прямой химической реакции; $[\text{CO}^-]$ и $[\text{O}_2]$ — соответственно концентрация отрицательных ионов угарного газа и кислорода воздуха.

После полной ионизации отрицательных ионов угарного газа электроны, как более подвижные, устремляются на сажевые частицы и компенсируют положитель-

ный заряд. Время движения электронов на сажевую частицу достаточно мало и этим временем можно пренебречь. Сам процесс заряда сажевых частиц и их нейтрализация носит колебательный характер. Период таких колебаний на основании (5) можно оценить следующим образом:

$$T = \frac{1}{k_f [O_2]} \quad (6)$$

Частота колебаний при температуре 2000 К и десятикратной компрессии составит ~ 6,5 МГц. При температуре 1500 К это будет соответственно 850 кГц и 223 кГц. Этот механизм возникновения электромагнитного излучения попадает в радиодиапазон и создает помехи для радиоприема.

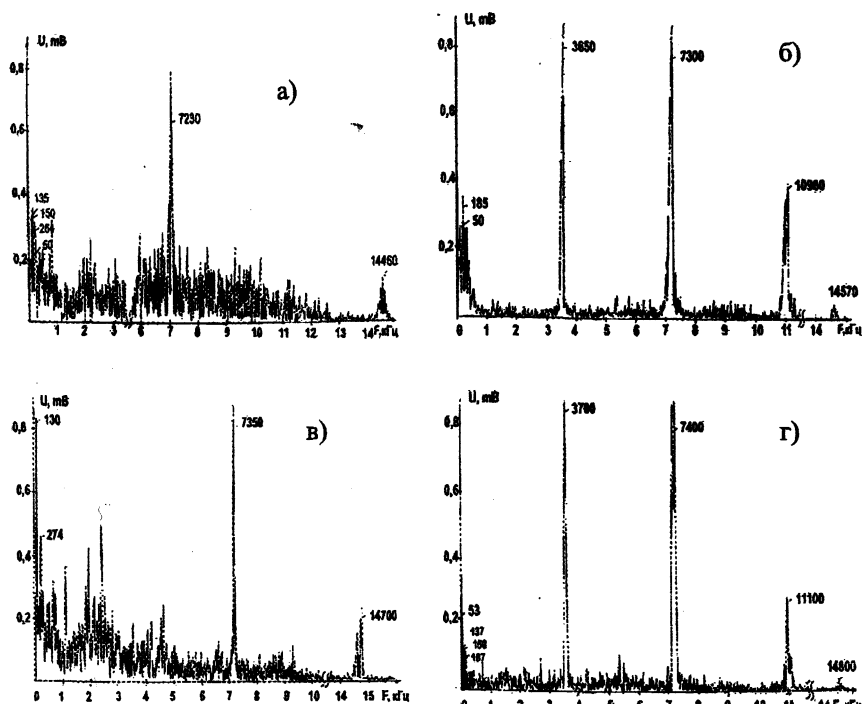


Рис. 8. Спектры амплитудных модуляций радиоишума, полученных от работающего двигателя Д30-II серии для нормально работающего двигателя а) — вблизи кольцевого газового коллектора; б) — вблизи жаровых камер; в) — вблизи кольцевого газового коллектора накануне выхода из строя; г) — вблизи жаровых камер накануне выхода из строя.

По выходе из форсунки часть жидких капель топлива попадает на внутренние стенки жаровых камер. Динамика формирования двойного электрического слоя аналогична сажевым частицам, только температура в пограничном слое не выше 1000–1500 К. Оценки по (6) дают частоты колебания двойного электрического слоя от 33 до 860 кГц.

Электрофизические процессы в плазме, которые возникают в процессе горения топлива, существенно зависят как от температуры горения топлива, так и от давления в камере сгорания. В области частот электромагнитных излучений выше 150 кГц помеховая обстановка довольно сложная. Поэтому регистрировать радиощум в целях осуществления непрерывной технической диагностики следует в области частот ниже 150 кГц.

Результаты мониторинга работы двигателя Д-30 II серии приведены на рис. 8. Полученные данные свидетельствуют о том, что радиоизлучение промодулировано неравномерностью горения топлива и механическими колебаниями работающего двигателя. Корреляционная обработка спектра амплитудных модуляций радиосигнала позволила убедиться, что техническая диагностика работающего двигателя вполне реальная вещь, а характер изменения частоты и амплитуды на резонансных частотах позволяет прогнозировать (предвидеть) возможный выход из строя вполне определенный узел в работающем двигателе и в общей конструкции двигателя.

В области частот 1–3 кГц проявляется эрозионное горение топлива вследствие горения сажевой пленки на стенках жаровых камер и сажевых частиц, образующихся при сгорании горючих газов. Эта область промодулирована работой первого и второго контуров, и поэтому спектр частот носит почти непрерывный характер. На спектре амплитудных модуляций четко выделяются частоты возмущения газового потока лопатками компрессора низкого давления, аналогично тому, как это имеет место при анализе звуковой эмиссии.

Анализ генерируемого радиощума позволяет предвидеть выход из строя исследуемого двигателя по многим его конструктивным элементам. В этом случае параметры, по которым принимается решение, охватывают не только первый контур низкого давления, но и второй контур высокого давления, а также осуществляется контроль процесса горения топлива в жаровых камерах. Поэтому такой метод является наиболее перспективным. Его использование позволяет предвидеть выход из строя не только самого двигателя, но и всей сложной механической конструкции, где установлен данный двигатель.

ЛИТЕРАТУРА

1. Голов Ф.В. Система диагностирования виброактивных узлов ДВС. // Двигателестроение. 1989. № 9. С. 21–24. 2. Минчев И.Д., Григоров В. Виброакустика поршневых машин. Теоретическая и прикладная механика. Варна 23–29 сент. 1985. // Докл. 5-го Нац. конгресса. София, 1985. Кн. 1. С. 291–298. 3. Гречихин Л.И. Двигатели внутреннего сгорания. Физические основы технической диагностики и оптимально-

го управления. Мн.: Наука і тэхніка, 1995. — 270 с. 4. Гречихин Л.И., Тимошевич В.Б. Техническая диагностика технологических процессов и энергетических устройств в машиностроении путем анализа генерируемого радиошума. / Машиностроение: Сб. научн. трудов. Вып. 17. Под ред. И.П. Филонова. — Мн.: УП «Технопринт», 2001. — С. 409–421. 5. Семапко Н.А., Физулаков Р.А. Прогнозирование времени до разрушения жаропрочной стали при испытании на длительную прочность. // XIV Петербургские чтения по проблемам прочности. Санкт-Петербург, 12-14 марта 2003 г.: Сб. тезисов. СПб, 2003. С. 244–245. 6. Мерсон Д.Л., Разуваев А.А. К вопросу идентификации механизмов пластической деформации и разрушения на основе спектрального анализа сигналов акустической эмиссии. // XIV Петербургские чтения по проблемам прочности. Санкт-Петербург, 12–14 марта 2003 г.: Сб. тезисов. СПб, 2003. С. 164. 7. Гречихин Л.И., Тимошевич В.Б. Безопасность движения. // V Международная научно-техническая конференция АВИА-2003. Киев, 23–25 апреля 2003 г.: Научные труды. Киев, 2003. 8. Беляев С.П., Волков А. Е., Морозов Н.Ф. и др. Эффекты памяти формы в никелиде титана после предварительного динамического деформирования. // Научные труды V Международного семинара «Современные проблемы прочности» им. В.А. Лихачева. 17–21 сентября 2001 года, Старая Русса. Великий Новгород: ЗАО «Новгородский Технопарк». 2001. Т. 2. С. 76–82. 9. Малинин Г.В. Исследование деформации мартенситной неупругости объектов различного фазового состава в условиях симметричного одноосного растяжения-сжатия. // Научные труды V Международного семинара «Современные проблемы прочности» им. В. А. Лихачева. Старая Русса, 17–21 сентября 2001 г. Великий Новгород, НГУ им. Ярослава Мудрого, 2001. Т. 1. С. 33–43. 10. Малинина Н. А., Малинин В. Г., Малинин Г.В. Особенности знакопеременной деформации материалов с эффектом памяти формы при многозвенных траекториях нагружения в пространстве напряжений. 1. Аустенитное состояние; 2. Мартенситное состояние; 3. Двухфазное состояние. // Научные труды V Международного семинара «Современные проблемы прочности» им. В. А. Лихачева. Старая Русса, 17–21 сентября 2001 г. Великий Новгород, НГУ им. Ярослава Мудрого, 2001. Т. 1. С. 43–61. 11. Авиационный двухконтурный турбореактивный двигатель Д-30 II серии. М.: Машиностроение, 1973. — 144 с.