

не только снижается чувствительность метода, но наблюдается изменение спектра возбуждаемой моды, что, естественно, скажется на достоверности измерения глубины УПС по данным скорости распространения ПАВ. Поэтому для повышения точности измерения C_R на разных частотах в объектах с УПС рекомендуется производить угловую подстройку амплитуды волны механическим или электронным (фазированная решетка) путем.

Важно отметить, что зависимости $A_R(\beta)$ и $A_T(\beta)$, полученные на разных частотах, несут информацию о качестве упрочнения УПС и могут быть использованы в качестве дополнительного информационного материала для определения глубины УПС. Если твердость на поверхности объекта с УПС известна, шероховатость поверхности $Rz \ll \lambda_{ПАВ}$, а точность установки β не хуже $0,1-0,2^\circ$, то представляется возможным производить предварительную оценку глубины УПС по данным амплитудных зависимостей $A_R(\beta)$, снимаемых как в режиме прохождения, так и в режиме отражения.

При падении продольной волны на образец под углом, близким ко второму критическому, существенно возрастает энергия ППВ и, соответственно, падает энергия возбуждаемой ПАВ. Наличие упрочненного поверхностного слоя, являющегося акустически неоднородным, вызывает рефракцию подповерхностной поперечной волны, что сопровождается изменением структуры поля излучения. Согласно полученным данным, для угла падения волны $\beta \approx \beta_2$ и значений характерной глубины слоя $h_\lambda < h_\lambda^*$ логарифмические зависимости $A_T^* = A_T/A_{TO}$ и

УДК 621.7.015:539.431

АНАЛИЗ ВЛИЯНИЯ КАЧЕСТВА ПОВЕРХНОСТНОГО СЛОЯ ДЕТАЛЕЙ ПОСЛЕ МЕХАНИЧЕСКОЙ ОБРАБОТКИ НА СОПРОТИВЛЕНИЕ ИХ УСТАЛОСТНОМУ РАЗРУШЕНИЮ

Барандич Е.С., Выслоух С.П.

Национальный технический университет Украины «Киевский политехнический институт»
Киев, Украина

Из теории резания металлов известно, что механическая обработка вызывает пластическую деформацию, нагрев и структурные преобразования в поверхностном слое материала обрабатываемой детали и сопровождается возникновением неравномерных по глубине и значению остаточных деформаций и напряжений. В зависимости от того, какое явление является доминирующим (пластическая деформация, нагрев или структурные преобразования), поверхностный слой может отличаться значениями глубины и степени упрочнения, величиной и знаком остаточных напряжений. Эти параметры, а также параметры шероховатости поверхности, в основ-

$A_{TR} = A_T/A_R$ от длины акустической базы l имеют квазилинейный вид. Причем (что весьма важно) их угол наклона ϕ к оси l уменьшается с ростом безразмерной глубины УПС (рис.2). Ослабление же подповерхностной волны с расстоянием по мере увеличения глубины УПС уменьшается. Т.е., вследствие эффекта рефракции значительная часть энергии ППВ концентрируется в окрестности создаваемого подповерхностного звукового канала. Т.о., установленное наличие однозначной связи между ϕ и h_λ для указанных амплитудных зависимостей, позволяет использовать еще один достаточно простой способ оценки глубины УПС.

Исследования (рис.3), проведенные в режиме отражения на частоте 10 МГц с использованием локальной иммерсионной ванны, показали, что при достаточно больших значениях $h > h^{**}$ зависимости $A_T(l)$ имеет ряд экстремумов, что было ранее обнаружено сотрудниками ЦНИИТМАШ (Москва). С одной стороны, это может быть использовано для оценки глубины УПС, коррелирующей с координатами положения экстремумов. С другой стороны, в этом случае эффекты рефракции существенно затрудняют измерительную процедуру оценки глубины упрочненного слоя h по данным угла наклона кривых $A_{T,R}(l)$.

1. Баев А.Р., Майоров А.Л., Асадчая М.В., Сергеева О.С., Коновалов Г.Е. Особенности возбуждения ПАВ в металлах с поверхностным упрочненным слоем. – Неразрушающий контроль и диагностика, 2012, №3, с.3-14.

ном характеризуют качество поверхностного слоя и оказывают существенное влияние на эксплуатационные свойства деталей.

В настоящее время известно большое количество научных исследований, которые подтверждают факт влияния параметров качества поверхностного слоя деталей приборов на их эксплуатационные свойства. Усталостная прочность деталей существенно зависит от шероховатости их поверхностей [1, 2]. Наличие на поверхности деталей, работающих в условиях циклических и знакопеременных нагрузок, отдельных дефектов и неровностей способствует концентрации напряжений, которые могут превысить предел

прочности. В этом случае поверхностные дефекты и штрихи от обработки играют значительную роль в возникновении субмикроскопических нарушений целостности металла поверхностного слоя и его разрыхлении, что является первопричиной образования усталостных трещин. Высота шероховатости, направление штрихов обработки, форма и шаг неровностей, размеры опорной поверхности и другие геометрические характеристики микрорельефа поверхности влияют и на другие важные эксплуатационные свойства деталей приборов, в том числе и на их прочность при ударной нагрузке, контактную жесткость, износостойкость, коэффициент теплопередачи, газовую эрозию и другие. Экспериментальные данные [3] свидетельствуют о том, что при увеличении шероховатости отпущенной стали 45 с $Rz=3,2$ мкм до $Rz=75$ мкм граница ее выносливости снижается с 285 до 200 МПа, то есть на 30%. В [3] показано влияние направления неровностей на предел выносливости стали при сгибании. При продольном направлении неровностей циклическая прочность при сгибании стали 2Х13 на 10-15% выше, чем при поперечном расположении неровностей. Эта закономерность проявляется при различных видах обработки. Неровности, образующиеся на поверхности в результате обработки, являются концентраторами напряжений [4] и служат одной из причин снижения усталостной прочности. Так, согласно данным С.В. Сёренсена, напряжение на дне рисок в 2-2,5 раза превышает среднюю величину напряжений поверхностного слоя. Причем концентрация напряжений зависит не только от глубины рисок, но и от их формы. Снижение шероховатости особенно влияет на увеличение усталостной прочности деталей из высокопрочных легированных сталей. Экспериментальное исследование усталостной прочности С.С. Филиным осуществлялось на образцах из стали 30ХГСА, предварительно подвергнутых термической обработке до HRC 35-37, на машине МУИ-6000 с частотой приложения нагрузки 3000 цикл/мин., база испытаний – $2 \cdot 10^6$ циклов. Цилиндрическая поверхность образцов обрабатывалась круглым шлифованием и полированием алмазными эластичными лентами. При этом 10 образцов полировались по 3 мин. и их цилиндрические поверхности, после окончательной обработки, имели систему канавок от предварительного шлифования. Увеличение времени полировки до 5 мин. позволило получить поверхность без следов от предыдущей обработки. Анализ результатов экспериментальных исследований показывает, что предел выносливости образцов при уменьшении их шероховатости от $Ra=0,74$ мкм до $Ra=0,22$ мкм в среднем увеличивается на 14%, а срок службы более чем

в три раза. Наличие небольших рисок ($R'_{max}=1,4$ мкм) на полированной поверхности образцов от начальной обработки приводит к уменьшению их усталостной прочности на 3-5%. Увеличение глубины этих рисок с $R'_{max}=1,4$ мкм до $R'_{max}=3,4$ мкм приводит, соответственно, к уменьшению усталостной прочности образцов на 4%. Исследования А.А. Маталина и Д.Д. Папшева свидетельствуют о том, что усталостная прочность деталей машин зависит не только от величины шероховатости, но и, в значительной мере, от степени наклепа и остаточных напряжений поверхностного слоя. Остаточные напряжения, их знак и глубина распространения, имеют значительное влияние на ресурс работы деталей, изменяя их усталостную прочность и предел выносливости. Это особенно важно для деталей машин и приборов, работающих в условиях знакопеременных нагрузок. Многочисленными исследованиями установлено, что при наличии в поверхностном слое остаточных напряжений сжатия предел выносливости детали повышается, а при наличии остаточных напряжений растяжения – снижается, причем остаточные напряжения сжатия существенно повышают предел выносливости, чем снижают ее такие же по величине остаточные напряжения растяжения. Влияние наклепа на усталостную прочность проявляется только до определенной степени начального наклепа. Если при предварительной обработке поверхности степень пластической деформации поверхностного слоя превышает определенное для данного металла значение, то в металле начинается процесс его роспуска (разрывы межатомных связей по плоскостям скольжения и субмикроскопические нарушения целостности металла), что происходит одновременно с процессом упрочнения, который продолжается. Это явление называется перенаклепом, которое вызывает резкое снижение усталостной прочности деталей, износостойкости и других эксплуатационных свойств. Упрочнение металла до определенных пределов уменьшает амплитуду пластической деформации и предотвращает возникновение субмикроскопических нарушений целостности, порождающих развитие усталостных трещин. Кроме того, создание упрочненного наклепанного поверхностного слоя препятствует увеличению существующих и возникновению новых усталостных трещин. Такой слой может значительно нейтрализовать вредное воздействие внешних дефектов и шероховатости поверхности. Результаты многочисленных исследований [3] показывают, что при наклепе металла, образующегося при точении и полировании, предел выносливости повышается на 20-25% за счет наклепа и на 12-15%

возрастает за счет снижения высоты шероховатости при переходе от точения к полированию. Исследованиями проф. А.А. Маталина установлено, что остаточные напряжения, упрочнение и шероховатость поверхности изменяют предел выносливости в соотношении $1,5 \times 1,25 \times 1,03$. В соответствии с исследованиями А.М. Сулимы [1] относительная значимость каждого из параметров качества поверхностного слоя в снижении предела выносливости образцов после шлифования составляет: шероховатость поверхности до 50%; упрочнение поверхностного слоя 40-45%; технологические остаточные напряжения до 5-10%. Это позволяет сделать вывод об отсутствии единого мнения относительно степени влияния того или иного параметра на предел выносливости материала детали. Структурные изменения металла при его механической обработке и, в частности прижоги шлифующихся поверхностей, является серьезной причиной снижения долговечности деталей. Обычно в зонах отпущенного металла, имеющего меньший удельный объем, развиваются остаточные растягивающие напряжения, которые снижают усталостную прочность деталей. При этом на границах участков измененной структуры часто образуются трещины, которые являются центром усталостных разрушений деталей. В работе [5] описаны микроструктурные изменения в поверхностных слоях обработанных закаленных сталей, которые авторы называют белыми и темными слоями. Первый, как правило, толщиной в несколько микрон, является результатом микроструктурных изменений, которые приводят к мартенситной структуры (для стали AISI 52100). Белый слой является нежелательным при изготовлении деталей,

поскольку он является твердый и хрупкий. Темный слой имеет большую толщину (20-40 мкм, в зависимости от условий технологического процесса), является мягким и пластичным через присутствие более закаленного мартенсита. Оптимальным является минимальный темный слой с твердостью незначительно ниже, чем в объеме материала.

Таким образом, известны данные о влиянии качества поверхностного слоя, методов и условий обработки на усталостную прочность деталей открывают возможности для создания современных методик технологического обеспечения усталостной прочности, что и разрабатывается в данное время.

1. Сулима А.М. Поверхностный слой и эксплуатационные свойства деталей машин / А.М. Сулима, В.А. Шулов, Ю.Д. Ягодкин. – М.: Машиностроение, 1988. – 240 с.
2. P.V. Jadhav, D.S. Mankar-Effect of surface roughness on fatigue life of machined component of Inconel 718 // Bharati Vidyapeeth Deemed University College of Engineering (Pune), International Conference vol. 11, 2010, p. 11.
3. Маталин А.А. Технология машиностроения: Учебник / А.А. Маталин. – Спб.: Лань, 2008. – 512 с.
4. Рыжов Э.В. Технологическое обеспечение эксплуатационных свойств деталей машин / О.В. Рыжов, А.Г. Сулов, В.П. Федоров. – М.: Машиностроение, 1979. – 179 с.
5. D. Umbrello¹, A. D. Jayal, S. Caruso¹, O. W. Dillon, and I. S. Jawahir Modeling of white and dark layer formation in hard machining of AISI 52100 bearing steel // Machining Science and Technology, vol. 14, 2010, p.128-147.

УДК 51-73

МОДЕЛИРОВАНИЕ ХАРАКТЕРИСТИК МИКРОМЕХАНИЧЕСКОГО ГАЗОВОГО СЕНСОРА С МЕМБРАНОЙ НА ОСНОВЕ ПОРИСТОГО АНОДНОГО ОКСИДА АЛЮМИНИЯ

Белогуров Е.А.¹, Таратын И.А.², Хатько В.В.¹

¹Белорусский национальный технический университет, Минск, Республика Беларусь

²ОАО Минский НИИ радиоматериалов, Минск, Республика Беларусь

Одним из путей повышения чувствительности и селективности химических (газовых) сенсоров является увеличение эффективной поверхности активного слоя, для чего применяют нанопорошки, специальные методы структурирования поверхности активного слоя, а также использование пористых материалов в качестве основы для нанесения чувствительных слоев. Применение напористых структур позволяет получить сенсоры с развитой поверхностью, имеющие большую эффективную площадь, занимаемую активными чувствительными материалами, и, следовательно, повышенную чувствитель-

ность сенсоров. Наиболее перспективным для структурирования газочувствительных пленок является нанопористый анодный оксид алюминия (АОА), представляющий собой упорядоченное скопление гексагональных ячеек с цилиндрическими порами в центре их, геометрическими параметрами которых можно управляемо варьировать путем подбора условий их формирования. Оксид имеет в своей основе упорядоченную структуру, которая улучшает целый ряд его механических свойств: упругость, микротвердость, износостойкость и др. Это делает возможным при использовании микросистемных техно-