

УДК 658.53 / .59:621.187.2

*А.В. Берман, Я.С. Ватулин, С.К. Коровин,
К.М. Первов, В.К. Первов*

**ОЦЕНКА ОСТАТОЧНОГО РЕСУРСА
МЕТАЛЛОКОНСТРУКЦИЙ ГОРНЫХ МАШИН
НА ОСНОВЕ ХАРАКТЕРИСТИК НЕСУЩЕЙ
СПОСОБНОСТИ МАТЕРИАЛА**

Семинар № 16

Многие виды горных машин относятся к опасным производственным объектам. Экспертиза промышленной безопасности этих объектов, связанная с продлением нормативного срока службы, требует применения различных видов не-разрушающего контроля. Достоверность оценки технического состояния оборудования во многом определяется используемыми средствами неразрушающего контроля. Анализ аварийности и травматизма на предприятиях показывает, что значительная часть отказов связана с медленно прогрессирующими повреждениями типа коррозионного или эксплуатационного износа, некачественного ремонта, применения несоответствующим условиям эксплуатации или неисправных комплектующих, нарушения технологии сварки. В частности, указанная проблема весьма актуальна при оценке остаточного ресурса металлоконструкций горных машин.

В настоящее время сформировалось несколько подходов к решению данной проблемы [1]. Во-первых, многие специалисты переходят от вероятностных методов оценки ресурса, основанных на статистике отказов, к оценке индивидуального ресурса стареющего оборудования на основе комплексного подхода, сочетающего результаты разрушающего и неразрушающего контроля с поверочными расчётами на прочность. Во вторых, при оценке остаточного ресурса заметна тенденция перехода от дефектоскопии к методам технической диагностики, основанной на сочетании механики разрушения, металловедения и исследования напряжённо-деформированного состояния оборудования и конструкций. В третьих, осознана необходимость 100 % обследования ста-

реющего оборудования с целью определения потенциально опасных зон. Как показывает практика, надёжность и ресурс оборудования определяются в основном зонами концентрации напряжений, в которых уровень фактических напряжений может достигать предела текучести и выше. Следует отличать традиционное понятие «концентратор напряжений», обусловленный конструкцией изделия, от материаловедческого понятия «концентрация напряжений», возникающая в зонах устойчивых полос скольжения дислокаций, обусловленных действием рабочих нагрузок. Многие применяемые методы поверочного расчёта на прочность не учитывают работу металла оборудования в условиях скольжения и сдвиговой деформации, хотя именно эти условия работы являются основными при его эксплуатации. Имеющиеся методики расчёта на прочность, как правило, предполагают независимое протекание процессов коррозии, усталости и ползучести, хотя на практике эти процессы протекают одновременно в различном сочетании. Наиболее коварной причиной внезапных разрушений металлоконструкции являются внутренние остаточные механические напряжения. Эти напряжения всегда внутренние и их образование всегда связано с неоднородными линейными или объёмными деформациями в смежных объёмах материала.

Остаточные напряжения делят на три рода, классифицируя их по протяжённости создаваемого ими силового поля: уравнивающиеся в пределах конструкции, кристаллитов структуры металла и в пределах кристаллической решётки. Внутренние напряжения – это проявление процессов взаимодействия собст-

венной внутренней энергии материала с энергией внешнего поля (силового, теплового и др.), воздействующего на материал, оформленный в виде конкретной конструкции. Поэтому к внутренним напряжениям относятся также напряжения, которые возникают в материале эксплуатируемой детали или конструкции под действием внешних полей и определяют сопротивляемость материала внешним воздействиям его прочность. При этом, изменение и перераспределение внутренней энергии материала между её составляющими под действием эксплуатационной нагрузки приводит к появлению «новых» остаточных напряжений. Поэтому для получения достоверных результатов расчёта остаточного ресурса прочности объектов, эксплуатируемых длительное время, необходимо знать в первую очередь фактические механические характеристики материала и характеристики его напряжённо-деформированного состояния, сложившегося к настоящему времени в результате эксплуатации объекта. На стареющем оборудовании наиболее опасным во многих случаях является «преддефектное» состояние металла, когда на уровне структуры произошли необратимые изменения, и повреждение из-за усталости может произойти внезапно и, как правило, в тех зонах, где оно не ожидается. Уровень «чувствительности» традиционных методов неразрушающего контроля не позволяет выявить «преддефектное» состояние металла. При взятии проб на оборудовании после длительной эксплуатации с целью оценки деградации металла специалисты дают заключение о состоянии металла только в месте взятия пробы. Как правило, пробы металла берут в зонах наиболее вероятного развития повреждений, хотя известно [1], что основными источниками повреждений являются зоны концентрации напряжений, возникающие в районах устойчивых полос скольжения дислокаций и обусловленные действием рабочих нагрузок. Эти участки на поверхности металла проявляются в виде линий с размером по ширине и глубине в начале своего развития не более нескольких микрон. Вероятность попасть в них при отборе проб металла очень низкая. Соответственно, поверочный расчёт на прочность с целью оценки остаточного ресурса на основании заключения о состоянии металла в месте взятия проб в ряде случаев имеет значительную погрешность.

В настоящее время технологии по определению технического состояния изделий направлены на применение дефектоскопии - поиск дефектов в виде трещин, пор, шлака, непроваров, несплавлений и других несплошностей, т.е. на определение параметров дефектов (координат, форм и их размеров). Однако выявление (обнаружение) дефектов традиционными методами является обязательным, но недостаточным условием для определения опасных концентраторов напряжений. Как известно, чем больше площадь дефекта, тем меньше необходима сила, которая разрушит изделие. Степень опасности для наиболее типичных дефектов определяется проектной организацией эмпирическим путем, т.е. путем сравнения бездефектного участка с дефектным участком. Но дефектоскопия как таковая не дает ответа на вопрос об опасности или неопасности выявленных дефектов, а только лишь фиксирует их наличие. В то же время полученные параметры обнаруженных дефектов в расчетах о состоянии изделий фактически не используются. Проектные организации разрабатывают «Правила контроля», которые оговаривают допустимость в изделии дефектов по типу, размеру и их количеству. Расчет прочности конструкции с дефектом достаточно сложная задача, поэтому наличие «допустимых» дефектов определяется в основном, как было отмечено выше, эмпирическим путем.

В работе [4] отмечается, что в основу теории и прогнозирования надёжности оборудования должно быть положено термодинамическое уравнение состояния твёрдого тела. Определены основные физические эффекты, сопровождающие механизм разрушения металла: механические, тепловые, ультразвуковые, магнитные, электрические и электромагнитные. Используя один или одновременно несколько параметров контроля, отображающих перечисленные факторы, представляется возможность оценивать напряжённо-деформированное состояние объекта контроля. Согласно [3], основными недостатками известных методов контроля и измерений напряжений и деформаций в основном металле изделий и сварных соединениях оборудования и конструкций являются: невозможность использования большинства методов в области пластической деформации; локальность контроля, их непригодность для контроля протяжённых конструкций; не учитывается изменение структуры металла; обязательность построения градуировочных

графиков на предварительно изготовленных образцах; необходимость специальной подготовки контролируемой поверхности металла (зачистка, намагничивание, клейка датчиков и др.); сложность определения положения датчиков контроля по отношению к направлению действия главных напряжений и деформаций, определяющих надёжность конструкции; большая неопределённость попадания в зону концентрации напряжений, являющуюся основным источником развития повреждений конструкции; отсутствия в широкой практике научно-обоснованных норм по допустимости размеров дефектов с точки зрения механики разрушения и прочности оборудования.

При оценке остаточного ресурса металлоконструкций горных машин (по сравнению с обычной дефектоскопией при нормальной эксплуатации) требуется применение средств и методов контроля изменяющихся свойств металла. К таким методам следует отнести, прежде всего, методы и средства, позволяющие контролировать на практике напряжённо-деформированное состояние металлоконструкции. Одна из важных и сложных проблем возникает при поиске и определении слабого звена при контроле металлоконструкции в единой комплексной системе факторов «структурно-механическая неоднородность-дефекты металлоконструкции-конструктивный и технологический концентратор напряжений», т.е. зон с высокой неоднородностью напряжённо-деформированного состояния или зон концентрации напряжений [3]. Это важно как при изготовлении металлоконструкции, для оптимизации технологического процесса, так и при её эксплуатации. При этом наиболее опасным является случай, когда дефекты, являясь концентраторами напряжений, совпадают с максимальными напряжениями от рабочих нагрузок.

Анализ критичности различных технологических дефектов сварных соединений в работе [5] показал, что, концентрация напряжений, вызванная формой стыкового шва, может быть более опасной, чем от выявленных внутренних технологических дефектов в виде пор и включений. С другой стороны, технологические дефекты в виде пор, включений, подрезов, отдельных несплавлений в сварных швах, как правило, работают как объёмные концентраторы напряжений, а непровары на значительной длине шва и форма шва - как плоские концентраторы напряжений. Поэтому наиболее эффективно проводить оценку качества сварных

соединений методом неразрушающего контроля, позволяющим определять фактическую концентрацию напряжений.

Структурная эволюция поверхности металлов отражается в изменении распределения работы выхода электронов (РВЭ) по поверхности. С ростом наработки выделяются два характерных участка на кривых распределения РВЭ [6].

Первый связан с пластическим деформированием материала поверхностного слоя в зоне максимальных напряжений. Важными особенностями этого участка являются локализованность падения РВЭ в области максимальных деформаций и насыщение РВЭ при определённой наработке. Второй участок соответствует росту РВЭ. Он непосредственно прилегает к первому. Возможными механизмами, объясняющими эффект роста РВЭ в поле циклических напряжений, являются: сглаживание атомарной шероховатости; образование поверхностных микротрещин; поверхностная диффузия в поле касательных напряжений. Учитывая, что при циклическом нагружении металлов активизируется вакансионный механизм деформирования, выглаживание атомарной шероховатости возможно за счёт потока вакансий с поверхности. Если источниками этих вакансий будут основания атомарных ступенек, то такой процесс в конечном счёте эквивалентен поверхностной диффузии, приводящей к заполнению поверхностных микровпадин материалом ближайших микровыступов. В итоге, за рост РВЭ, повидимому, отвечает диффузия, активизируемая циклическими напряжениями. Минимумы потенциального рельефа на кривых распределения РВЭ по поверхности связаны с появлением атомарных ступенек, которые несут электрический заряд. Ступеньки сопровождают зарождение и выход на поверхность деформационных дислокаций,двигающихся под влиянием знакопеременных механических напряжений. Таким образом, картина потенциального рельефа обладает прогнозируемыми возможностями, поскольку она формируется факторами, предшествующими разрушению. В зоне активных циклических деформаций происходит генерирование дислокаций и на формирование энергетического рельефа основное влияние оказывает изменение структуры самого металла. Образование выступов, заряженных ступенек приводит к уменьшению РВЭ, а провалы и микротрещины сопровождаются ростом РВЭ. Оба эти фактора могут действовать одновре-

менно или сменяя друг друга. Зародившиеся дислокации под влиянием внешних переменных напряжений движутся в пересекающихся системах скольжения. Часть из них выходит на поверхность. В результате выхода дислокаций на поверхность образуются поверхностные ступеньки. Известно, что эти ступеньки несут электрический заряд и, следовательно, образуют электрические диполи. Вклад дислокационных диполей приводит к уменьшению работы выхода.

Изучая естественные монокристаллы магнетита и пирротита, Вэйс еще в 1904 году показал, что их магнитные свойства неодинаковы в различных направлениях [8]. Это явление получило название магнитокристаллической анизотропии (далее по тексту - магнитной анизотропии). Оно присуще и другим ферромагнетикам.

Направление, в котором кристалл намагничивается при наиболее слабых магнитных полях, получило название направления легкого намагничивания. У высоко-проницаемых магнитомягких ферритов таким направлением является диагональ куба кристалла. Направление ребра куба для них является направлением трудного намагничивания. У кристаллов других ферромагнетиков направлениями легкого намагничивания могут быть другие кристаллографические оси.

Количественно магнитную анизотропию обычно характеризуют "первой константой анизотропии" K_1 . Эта константа для большинства ферромагнетиков (в первом приближении) пропорциональна энергии, необходимой для поворота спинов, заключенных в 1 см^3 вещества, из направления легкого намагничивания в направление трудного намагничивания. Ферромагнитные тела состоят из областей, в которых спины имеют определенное направление, совпадающее с направлением одной из кристаллографических осей. Такие области называют доменами.

Применяемые на практике ферромагнитные материалы состоят из множества микрокристаллов, являются поликристаллическими средами. Направления вектора намагниченности в различных ферромагнитных областях поликристаллического тела различны. Разделение тела на области (домены) происходит таким образом, что создаваемый этими областями магнитный поток замыкается внутри тела. В каждой такой области намагниченность однородна и по величине равна намагниченности насы-

щения ферромагнетика при данной температуре. В природе не бывает абсолютно жестких изменений физических свойств. Поэтому на границе между ферромагнитными областями, в которых магнитные моменты спинов ориентированы антипараллельно (то есть навстречу друг к другу) или перпендикулярно друг к другу, находится слой атомов, магнитные моменты которых постепенно переходят от одной ориентации к другой.

Форму и расположение доменов в классической физике определяют при помощи суспензий, содержащих магнитный порошок, который сам располагается на границах между доменами. Также поступают в магнитопорошковой дефектоскопии. Толщина граничных слоев (их называют стенками Блоха) оценивается в несколько десятков, а иногда и в несколько сотен ангстрем. Воздействие на ферромагнетик внешнего магнитного поля приводит к перемещению граничного слоя и с ростом поля - к увеличению доменов, магнитные моменты которых составляют острый угол с направлением внешнего поля. Рост доменов происходит за счет областей, магнитные моменты которых неблагоприятно ориентированы по отношению к внешнему полю. В результате этого процесса появляется избыточный магнитный момент тела в направлении внешнего поля, который и определяет собой его намагниченность. Такой механизм намагничивания получил название "смещение доменных границ".

При перемещении граничного слоя изменяется направление спинов как в атомах самого граничного слоя, так и в атомах того объема ферромагнетика, который он уже пересек. В слабых полях процесс смещения является обратимым. С повышением напряженности поля все большую и большую роль начинает играть необратимый процесс смещения. Наличие в ферромагнетике пор, включений и неоднородностей кристаллической структуры уменьшает магнитную проницаемость, так как препятствует перемещению граничных слоев. Вокруг пор и неферромагнитных включений, размеры которых больше ширины граничных слоев, образуются дополнительные домены, получившие название субобластей, или субдоменов. Образование субдоменов энергетически выгодно, так как энергия, затрачиваемая на их создание, меньше энергии, необходимой для создания магнитных полюсов в районе пор, неоднородностей и других дефектов. Намагничи-

вание ферромагнетиков, особенно в сильных полях, происходит также в результате процесса вращения. Этот процесс заключается в том, что спины, преодолевая силы магнито-кристаллической анизотропии, стремящиеся удержать их в направлении легкого намагничивания, поворачиваются в направлении внешнего поля.

Намагничивание ферромагнитных сред неразрывно связано с явлением магнитоstriction. Это явление заключается в том, что под воздействием магнитного поля ферромагнитное тело изменяет свои размеры. При положительной магнитоstriction тело удлиняется в направлении намагничивания, при отрицательной - сжимается. Отрицательная магнитоstriction характерна для большинства ферромагнетиков, в том числе и для сталей. Размеры тела можно изменить механическим воздействием. Оказывается, что при растяжении ферромагнетиков с положительной магнитоstriction их намагниченность возрастает. У ферромагнетиков с отрицательной магнитоstriction намагниченность возрастает при сжатии тела, а при растяжении - уменьшается. Возникающая при механическом воздействии анизотропия магнитных свойств именуется магнитомеханической анизотропией.

Все общепринятые методы дефектоскопии нацелены на поиск разрывов сплошности металла (пор, раковин, трещин и т.п.) или инородных включений (шлак и пр.). Это, несомненно, важная задача для оценки качества изделия «в общем смысле» этого термина. Если же ставится задача оценки опасности технического состояния участка конструкции, то знания положения и размеров дефекта оказываются не достаточно. Дело в том, что условием разрушения любой конструкции (даже неметаллической) является наличие концентратора механических напряжений (КМН) и высокого градиента механических напряжений (для конструкционных сталей – разности главных механических напряжений РГМН). Не всякий дефект создает местную КМН, а, тем более, формирует высокий градиент РГМН. Поэтому наличие дефекта в виде разрыва сплошности или инородного включения не является достаточным признаком опасного технического состояния. Более того, с некоторыми значительными по размерам дефектами конструкции могут «жить» многие годы. С другой стороны, дефект может отсутствовать в точке, где КМН и градиент РГМН велики (например, при зарожде-

нии межкристаллитной коррозии). Такие места стандартные методы дефектоскопии обязательно пропустят. Именно поэтому нередки случаи аварий сразу после проведения дефектоскопии, по результатам которой был сделан вывод о «бездефектности» конструкции.

Есть существенные различия и в методологиях методов, приближающихся к идее оценки технического состояния конструкций по распределению КМН и РГМН. Вся информация, которая каким-либо образом может быть извлечена из металла и использована в каких-либо целях, в том числе – в целях дефектоскопии, с помощью магнитного тестового поля, содержится в параметрах петли магнитного гистерезиса. Очевидно, что, чем больше параметров петли тот или иной метод использует в задачах дефектоскопии, тем он достовернее.

Коэрцитиметры. Метод дефектоскопии может быть основан на оценке значения H_c - коэрцитивной силы. Этот параметр действительно связан с напряженным состоянием металла и во многих случаях позволяет обнаруживать дефекты. Однако, при изменении химического состава стали и других условий H_c изменяется по сложным законам, что резко затрудняет распознавание ситуации: есть дефект или его там нет, есть КМН или градиент РГМН или нет. Кроме того, это всего лишь одна точка на сложной петле гистерезиса. Возможно чрезвычайно много вариантов пересечения точки H_c кривой в пределах одного и того же напряженного состояния металла. Из-за этого при попытках оценки КМН и РГМН коэрцитиметры очень часто дают ложные показания. Достоинство: H_c – характеристика предельной петли гистерезиса, от магнитного поля Земли не зависит.

Методы, основанные на измерении остаточной индукции B_r . Все, сказанное о коэрцитиметрах, полностью относится и к приборам этого класса методов: достаточно вместо H_c рассматривать B_r

Метод магнитной памяти металлов. На самом деле это вариант давно известных модификаций метода, основанного на измерении остаточной индукции B_r . «МММ»-метод сохраняет все недостатки и коэрцитиметров, и методов, основанных на оценке B_r , а также добавляет огромное количество новых недостатков. Метод "магнитной памяти" усугубляет все недостатки вышеназванных методов [7].

Отличие «метода магнитной памяти» от ранее известных способов в том, что остаточная

индукция, регистрируемая в нем, формируется за счет намагничивания металла в очень слабом магнитном поле (Земли и окружающих местных случайных «генераторов» магнитного поля, например, сварочных аппаратов), то есть по случайной частной петле гистерезиса, а не в предельном цикле. В результате в методе «магнитной памяти» B_g перестает быть характеристикой материала в каждой конкретной ситуации. Поэтому в совершенно одинаковых случаях (с дефектами или без них), но при различных условиях намагничивания, будут получаться разные результаты измерений, а, следовательно, распознавание дефекта становится не достаточно надежным. Именно поэтому в технических характеристиках приборов на основе этого эффекта отсутствуют показатели распознавания дефектов или механических напряжений, а фигурируют показатели измеряемых магнитных характеристик (они и аттестуются по магнитным параметрам). Исключение составляют ситуации с признаками критического состояния, когда рост механических напряжений до опасного уровня происходит на очень коротком расстоянии и формируются «линии скольжения». Это исключение обусловлено тем, что именно по таким линиям (микронной толщины) металл полностью теряет все свои магнитные свойства ($H_c = 0$, $B_g = 0$). Эти линии можно обнаружить достаточно чувствительным прибором, предназначенным для измерения любой магнитной величины. Специальных приборов для этого не требуется.

Достоинство: чувствительный элемент прибора может иметь очень маленькие размеры, что облегчает его использование как индикатора линий скольжения (и только этих линий!) на поверхностях большой кривизны (трубы малого диаметра и пр.)

Электромагнитный метод основанный на эффекте магнитокристаллической анизотропии [7]. Здесь, во-первых, измеряется несколько параметров петли гистерезиса, что сразу повышает достоверность распознавания. Во-вторых, используется эффект зависимости магнитной анизотропии металла от его напряженного состояния (измеряется угол поворота вектора магнитной индукции, который тоже зависит от напряженного состояния, но по иному закону), а следовательно, оценивается дополнительный комплекс параметров, что также повышает достоверность контроля. Кроме того, технология обработки результатов измерений построена так, чтобы результаты измерений по

обследуемой поверхности металла корректировали сами себя за счет специальной математической обработки по аналогии с рентгеновской томографией, что исключает пропуск любых аномалий, а, следовательно, дефектов типа разрыва сплошности среды (создающих КМН), градиентов РГМН и иных концентраторов напряжений. Благодаря этому, оператор имеет возможность пропуска целых участков поверхности (например, покрытой набрызгами или занятой сварным швом) без ущерба достоверности итоговому результату. Кроме того, формы представления результата дефектоскопии в виде карт позволяют использовать особенности зрительного анализатора человека и его скрытые (интуитивные) способности. Технические характеристики приборов непосредственно указывают на их способность распознавания концентраторов механических напряжений и градиента РГМН.

Следует заметить, что карты полей, формируемые в данном методе, и, например, карты ультразвукового контроля толщины, не эквивалентны. Первые преобразованы из многомерного пространства коррелируемых признаков, а вторые - из обычных независимых точечных оценок отсчетов (потому-то они и не используют "человеческий фактор"). Предлагаемая технология позволяет сразу рисовать карты расположения концентратора в зоне контроля, подобные географическим картам. С той лишь разницей, что на картах напряжений изображаются не горы, а концентраторы напряжений, и не высоты холмов, а коэффициенты концентрации напряжений. В основе технологии находится эффект магнитной анизотропии и учет основных явлений, связанных с ней. Конструкторы для определения остаточных напряжений выбрали в качестве измеряемого фактора такой показатель, как <разность главных механических напряжений>. Выбор обусловлен тем, что для упруго-пластичных материалов (каковыми являются конструкционные стали) справедлив так называемый третий критерий прочности (критерий Треска). По этой причине карта РГМН, по сути, наглядно описывает не только параметры распределения поля механических напряжений, но и прочностной образ исследованного участка металла. При использовании обычных дефектоскопов по измеренным размерам и координатам дефекта с помощью исключительно теоретических модельных представлений можно вычислить значения КМН и градиенты РГМН, по которым судят о степени опасности дефектного

участка конструкции. В случае использования эффекта магнитокристаллической анизотропии оценивается результат не путем математических расчетов согласно какой-либо модели материала и дефекта, а непосредственно по параметрам возмущения физического поля. Это исключает субъективизм оценок, ошибки модельных представлений и вычислений, упрощает достижение конечной цели подобного исследования - получение распределений РГМН и КМН. Следует иметь в виду, что приборы на эффекте магнитокристаллической анизотропии не дефектоскопы. Если в зоне измерений имеется дефект, не создающий существенного возмущения поля механических напряжений (т.е. не являющийся концентратором напряжений), то он не будет замечен на картах РГМН и КМН. В то же время, любой концентратор механических напряжений независимо от его размеров (зародыш будущего дефекта, не обнаруживаемый методами традиционной дефектоскопии) будет обнаружен на картах РГМН и КМН. Поскольку необходимыми и достаточными условиями разрушения упругопластического тела является наличие КМН и высокого значения градиента РГМН, появляется возможность классифицировать выявленные КМН по степени их опасности прямыми экспериментами.

Таким образом, применение магнитомеханической анизотропии позволяет выявить зарождающиеся трещины и зоны с повышенными механическими напряжениями, превышающими их общий уровень в десять и более раз. Эти превышения видимо являются результатом суммирования напряжений, возникших в процессе эксплуатации конструкции, и остаточных термических напряжений, не снятых термообработкой при его изготовлении. Между тем, в области остаточных напряжений традиционные дефекты могут отсутствовать. Однако, если режим термообработки был выбран неправильно, остаточные напряжения могут привести даже при небольшом нагружении конструкции, к ее разрушению. Аварии и катастрофы можно предотвратить, если искать не только дефекты, но и опасные напряженные места в конструкциях.

В тоже время, совокупность доменов и междоменных границ составляет доменную структуру магнитного материала. Взаимодействием этой структуры с дефектами кристаллической решетки и с макроскопическими дефектами определяются все структурно-чувствительные свойства магнитных материалов. Наличие внутренних напряжений приводит к изменению энергии междоменной грани-

цы. При наличии дефектов структуры в виде включений возникают поля рассеяния, образуя доменную субструктуру. Магнитный поток обтекает включения, и внутри домена образуются малые домены и, соответственно, дополнительные междоменные границы. При росте одних доменов за счёт других происходит переход границы через включение, что сопровождается увеличением поверхностной энергии. Макроскопические поры действуют так же, как и неферромагнитные включения. В процессе упругих и пластических деформаций ферромагнетика доменная структура претерпевает значительные изменения. Одноосные упругие деформации приводят к существенной перестройке типа магнитной структуры, изменяют размеры отдельных доменов и вид междоменных границ. Такая перестройка структуры существенно изменяет электромагнитные характеристики материала — величины продольной и поперечной магнитострикции, вихрековых и полных магнитных потерь, магнитной проницаемости и др. Пластическая деформация, внося в ферромагнетик дефекты кристаллической структуры, измельчает магнитную доменную структуру, то есть затрудняет процессы смещения доменных границ. При этом характер возникающих дефектов и особенности их распределения в кристалле обуславливают соответствующие изменения электрофизических свойств. Любое воздействие на металл, приводящее к увеличению в нём дефектов кристаллического строения, приводит к увеличению электрического сопротивления. Таким образом, изменения электрофизических свойств металлов при действии нагрузок соответствуют изменениям в структуре и накоплению повреждений.

Анализ общих закономерностей взаимосвязи механических и электрофизических свойств металлов с параметрами гармонических составляющих вторичного электромагнитного поля, проведённый на основе системы уравнений Максвелла, описывающих внешнее электромагнитное поле в пространстве вокруг преобразователя, показывает возможность их использования в задачах диагностики и прогнозирования ресурса оборудования. Универсальность электромагнитного метода обусловлена тем, что все реологические, магнитные и электрические свойства – производные электродинамических полей. Электроны вихревого потока, перемещаясь по этим полям, воспринимают информацию о них. Они пересекают кристаллические и металлографические структуры, дислокационные и доменные поля, спонтанно образующиеся замкнутые области

реологических структур, огибают нарушения сплошности. Носителями информации о свойствах объекта являются параметры гармонических составляющих вторичного электромагнитного поля, возбуждаемого вихревыми токами.

Перспективными для контроля металлоконструкций горных машин являются электромагнитные методы, которые являются бесконтактными, позволяют получать информацию в виде электрических сигналов. Механические и электрофизические свойства материалов заложены на уровне структуры материала и взаимосвязаны [2, 11]. Не случайно, одно из основных направлений развития средств диагностики материалов – поиск возможностей определения неких механических характеристик материала, связанных с его напряжённым состоянием, по параметрам физических полей, используемых для диагностики. Поэтому определение свойств материала при проведении диагностики сводится к измерению изменений неких параметров используемых физических полей. Иными словами, если на объект исследования, обладающий некоторыми заранее неизвестными способностями сопротивляться внешним воздействиям, оказать воздействие физическим полем, имеющим известные или заданные параметры, то изменения параметров используемого поля, вызванные реакцией объекта, будут представлять «отпечаток» его свойств в области, заданной типом физического поля. При этом, «отголоски» реакции будут видны и в пространстве других полей, но как косвенные «отпечатки» или вторичная реакция. Принципиально важными параметрами полей, вводимых в материал для исследования его свойств, являются энергетические параметры и, в первую очередь, интенсивность (средняя по времени энергия переносимая вводимым полем через единичную площадку, перпендикулярную к направлению распространения энергии) и мгновенная мощность (мощность поля в данный момент времени). Вводимое в исследуемый материал поле, взаимодействуя с

собственными полями материала, меняет его свойства. При этом характер, величина изменений определяются динамическим соотношением энергий взаимодействующих полей [3, 10]. Все изменения в структуре материала в процессе деформирования разрушения, зарождение и развитие микрповреждений отражаются в соответствующих изменениях электрофизических параметров [2, 7, 9]. Применение электромагнитного метода диагностики, как дополняющего традиционные методики оценки остаточного ресурса металлоконструкций горных машин позволит находить нарушения сплошности, оценить химический состав металла, установить металлографическую структуру основного металла, определить величину зерна, оценить особенности структурных включений и химико-термического воздействия на поверхностные слои и твёрдость металла, проанализировать кинетику потери устойчивости и усталостные процессы, измерить остаточные и рабочие напряжения в металле в т.ч. и после сварки, оценить интеркристаллитную коррозию и вязкостное трение. Комплексная оценка вышеперечисленных факторов позволит более корректно прогнозировать потерю устойчивости элементов металлических конструкций, их усталостное разрушение.

Технология комплексной обработки металлоконструкции горных машин, включающая операцию контроля фактического напряженно-деформированного состояния объекта, обеспечивает гарантированное управление уровнем концентрации остаточных механических напряжений и релаксацию концентраторов механических напряжений, а также управление градиентом механических напряжений (для конструкционных сталей – разности главных механических напряжений). Такая технология позволит перейти от оценки технического состояния и прогнозирования ресурса металлоконструкции к управлению её эксплуатационными свойствами.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Дубов А.А., Дёмин Е.А., Миляев А.И., Стеклов О.И. Контроль напряжённо-деформированного состояния газопроводов // Газовая промышленность, 2002, № 2, с. 58-61.

2. Кузеев И.Р., Баширов М.Г. Электромагнитная диагностика оборудования нефтехимических и нефтеперерабатывающих производств. – Уфа: Изд-во УГНТУ, 2001. - 294 с.

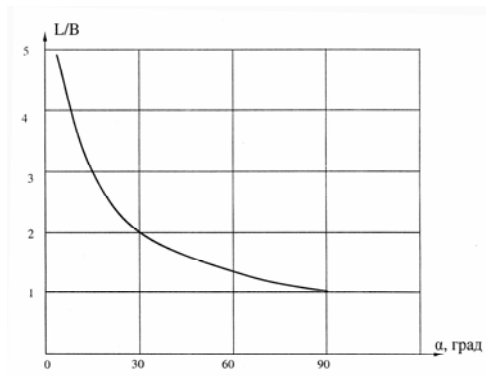
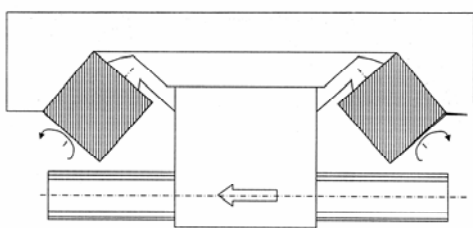
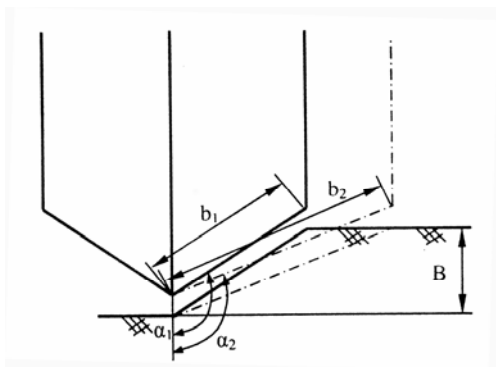
3. Дубов А.А., Дёмин Е.А. Использование магнитной памяти металла и компьютерных приборов для контроля качества сварных соединений // Прикладная физика, 2001, № 2, с. 51-58.

4. Комаровский А.А. Диагностика напряжённо-деформированного состояния // Контроль. Диагностика, 2000, № 2, с. 22-27.

5. Макаров И.И. Критерии оценки технологических дефектов в сварных конструкциях // Сварочное производство, 1975, № 12, с. 9-11.

6. Левитин В.В., Лоскутов С.В., Серпецкий Б.А. О физическом механизме развития усталостных процессов // Вестник Запорожского государственного университета, 1999, № 1, с. 1-4.

7. Жуков С.В., Копица Н.Н. Исследование параметров полей механических напряжений в металлических



НОВЫЙ ОРГАН ОЧИСТНОГО КОМБАЙНА

Теоретическая производительность узкозахватного очистного комбайна ограничивается шириной захвата исполнительного органа $B \leq 1$ м [1].

Новый исполнительный орган обеспечивает повышение производительности комбайна полосы при постоянной ширине захвата $B = \text{const}$ за счет изменения угла наклона оси исполнительного органа.

228

конструкциях приборами "Комплекс-2" // Сб. научн. трудов, Академия Транспорта, Отд-е "Спец.проблемы транспорта", 1999, с. 214-223.

8. Рабкин Л.И., Соскин С.А., Эпштейн Б.Ш. Технология ферритов. - М.:ГЭИ, 1962.

9. Хмелевская В.Б., Леонтьев Л.Б., Лавров Ю.Г. Технология восстановления и упрочнения деталей судовых механизмов и триботехнические характеристики полей/ СПб.: СПГУВК, 2002.

10. Стефан В.В. Тентлер А.В. Подольский В.Е. Управление уровнем концентраторов механических напряжений деформированного состояния в стальных конструкциях/ Журнал Контроль. Диагностика/ №7 2003 г. с.61-64.

11. Козлов Э.В., Теплякова Л.А., Конева Н.А. и др. Роль твердорастворного упрочнения и взаимодействий в дислокационном ансамбле в формировании напряжения течения азотосодержащей аустенитной стали // Изв. вузов. Физика. 1996. № 3. с. 33.

Коротко об авторах

Берман А.В. – ЗАО «Прочность»,

Ватулин Я.С. – ПГУПС,

Коровин С.К. – ПГУПС,

Первов К.М., Первов В.К. – Московский государственный горный университет.



© А.П. Комиссаров, 2005

УДК 622.272

А.П. Комиссаров

НОВЫЙ ИСПОЛНИТЕЛЬ-

Семинар № 16

На рис. 1 показана схема формирования снимаемой полосы породы при изменении угла наклона оси исполнительного органа к направлению подачи комбайна α .

Данное техническое решение было защищено авторским свидетельством [2], однако разработка не была внедрена.

В 2000 г. фирма «Айкгофф машиненфабрик ГмбХ» (Германия) публикует результаты работ по созданию «струга со шнековым исполнительным органом» [3] (рис. 2). Выполненные фирмой экспериментальные исследования показали, что производительность по отбойке и навалочная способность струга повышается на 40–50 %.

В данной статье приведены соотношения между режимными параметрами исполнительного органа и углом наклона оси исполнительного органа к направлению подачи комбайна α .

На рис. 3 приведен график зависимости относительной (относительно ширины захвата) ширины полосы от угла α .

Рис. 1. Схема формирования срезаемой стружки

Рис. 2. Струг со шнековым исполнительным органом

Рис. 3. График зависимости относительной ширины полосы от угла α

Соотношение между скоростями резания и подачи для нового исполнительного органа имеет вид

$$V_n = V_p \cdot h \cdot Z_{лр} / (\pi \cdot D \cdot \sin \alpha),$$

где $Z_{лр}$ – количество резцов в линии резания; D – диаметр исполнительного органа.

Таким образом, при изменении угла наклона исполнительного органа увеличивается скорость подачи и, соответственно, производительность комбайна.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Солод В.И., Зайков В.И., Первов К.М. Горные машины и автоматизированные комплексы. – М.: Недра, 1981. – 503 с.
2. Исполнительный орган горной машины. А.с. № 798288. - Оpubл. 23.01.81.
3. Буссманн Х., Нинхаус К. Перспективы комбайновой выемки угля на тонких пластах // Глюкауф, - № 2 (3), сентябрь 2000 г.

4. Комиссаров А.П., Тургель Д.К. Анализ резервов роста производительности очистных комбайнов. // Тр. Конференции СГИ. – Свердловск, 1986.
5. Комиссаров А.П., Тургель Д.К., Суслов Н.М. Оценка выемочных возможностей очистных комбайнов // ЦНИИТЭИтяжмаш. - № 1. – 1988.
6. Комиссаров А.П., Тургель Д.К. Способ повышения производительности горного комбайна // Изв. вузов. Горный журнал. - № 5. – 2002. – С. 36-37.

Коротко об авторах

Комиссаров А.П. – доцент, Уральский государственный горный университет.