

А. Е. ЗОРИН, д-р техн. наук

ООО «ОМИКОН Текнолоджис» (Москва, Россия)

ДИАГНОСТИЧЕСКИЙ КОМПЛЕКС «MicroLab-Z2» – ИННОВАЦИОННОЕ РЕШЕНИЕ ДЛЯ НЕРАЗРУШАЮЩЕГО ВЫСОКОТОЧНОГО КОНТРОЛЯ КАЧЕСТВА И СВОЙСТВ МЕТАЛЛА КОНСТРУКЦИЙ

Аннотация

В статье описывается разработанная технология неразрушающей оценки механических свойств металла конструкций. На первом этапе выполняется обучение нейросети, устанавливающей корреляцию между ключевыми параметрами строения металла (химическими, структурными и деформационными), и механическими свойствами металла. На втором этапе выполняется сбор данных о параметрах строения металла конструкции с использованием разработанного диагностического комплекса «MicroLab-Z2». На третьем этапе выполняется обработка данных и их перевод в механические свойства.

Ключевые слова: оперативная диагностика металла, диагностический комплекс MicroLab-Z2, неразрушающая оценка механических свойств металла, машинное обучение, нейросеть, подготовка поверхности металла, микротвердость, микроиндентирование, структура металла, деформационные параметры металла, охрупчивание металла, упрочнение металла

В процессе производства и эксплуатации ответственных металлических конструкций возникает необходимость оперативного контроля состояния их металла. При производстве даже самые незначительные отступления от оптимальных режимов и технологий могут сказаться на качестве изделия. Как следствие, свойства металла однотипных конструкций, находясь в пределах допустимых значений, могут отличаться до 30-50% и более. С такой неопределенностью изделие поступает к заказчику и в ряде случаев может не обеспечить требуемую несущую способность или долговечность. Эксплуатация тоже вносит свой вклад. Непроектные циклические нагрузки, воздействие агрессивных сред и температур могут привести к развитию негативных процессов в металле, снизив его работоспособность до критического уровня.

Поскольку эксплуатирующие организации не владеют указанной информацией, при выполнении расчетов прочности и долговечности они вынуждены использовать заранее принятые значения механических свойств металла (нормативные, сертификатные и т.д.).

При этом реализуется два сценария:

– если фактические свойства металла будут выше нормативных или сертификатных, это приведет к перебраковке дефектов, то есть к

необходимости вырезать те из них, которые не угрожают работоспособности конструкции;

– если же они будут ниже - это приведет к оставлению в эксплуатации опасных дефектов и риску разрушения конструкции.

Поскольку проводить разрушающие испытания на реальной конструкции для установления ее фактических механических свойств невозможно, единственный вариант выхода из сложившейся ситуации – это использование неразрушающих технологий.

Известно, что любые механические свойства металла определяются тремя группами параметров его строения:

– химическими: содержание легирующих и микролегирующих элементов, вредных примесей;

– структурными: сюда относится тип, параметры структуры, параметры неметаллических включений, ликвации хрупких фаз и т.д.

– деформационными: к ним относится совокупный уровень упрочнения металла и его влияние на механизм и предельный уровень пластической деформации металла.

Соответственно, наиболее эффективный подход к неразрушающей оценке механических свойств металла заключается в получении и обработке данных параметров.

Поскольку комбинаций параметров строения металла может быть очень много, влияние каждого из них на различные механические свойства, с учетом взаимосвязи с другими параметрами, достаточно сложно установить. Однако, для решения данной задачи могут быть использованы методы машинного обучения, учитывая возможность получения массива данных для «тренировки» такой нейросети (рисунок 1).

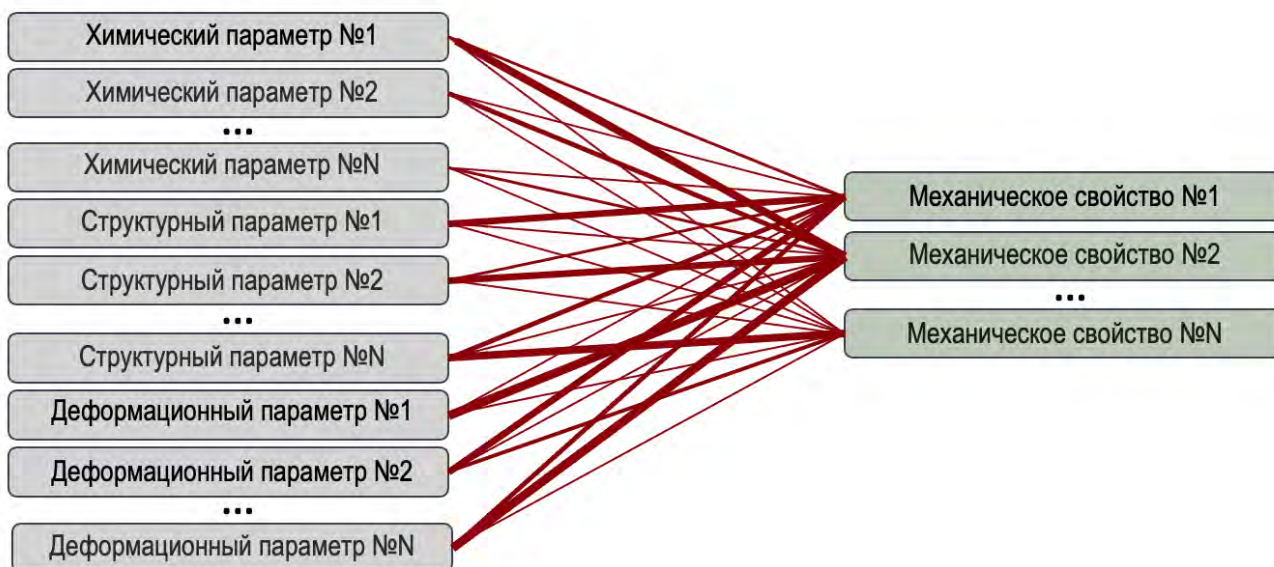


Рис. 1. Принципиальная схема нейросети для установления корреляции между параметрами строения и механическими свойствами металла

С учетом изложенного была разработана технология неразрушающей оценки механических свойств металла конструкции, включающая в себя три этапа.

Первый этап – проведение предварительных исследований. Он выполняется всего один раз при изучении новых классов сталей или типов конструкции. На данном этапе проводится комплекс лабораторных и экспериментальных исследований, в рамках которых для исследуемого металла в различных состояниях определяются, с одной стороны, параметры строения металла, которые могут быть определены на конструкции с использованием неразрушающих технологий, а с другой стороны – интересующий комплекс механических свойств.

Полученная информация используется для обучения нейросети, позволяющей установить влияние различных комбинаций параметров строения металла на его свойства.

В разработанной нейросети в качестве исходных данных используются 43 химических, структурных и деформационных параметра строения металла (содержание различных химических элементов, тип и параметры структуры, параметры загрязненности неметаллическими включениями, степень упрочнения и охрупчивания металла), а в качестве выходных данных – 6 наиболее часто используемых механических характеристик (предел текучести σ_T , предел прочности σ_B , относительное удлинение δ , относительное сужение ψ , ударная вязкость KCV^{20} , критический коэффициент интенсивности напряжений K_{IC}). При этом важно отметить, что аналогичным способом могут определяться любые необходимые механические свойства металла.

На втором этапе выполняется сбор данных. Данные о химическом составе металла могут быть получены с использованием портативных спектрометров, а для определения структурных и деформационных параметров разработан уникальный диагностический комплекс «MicroLab-Z2» (рисунок 2).

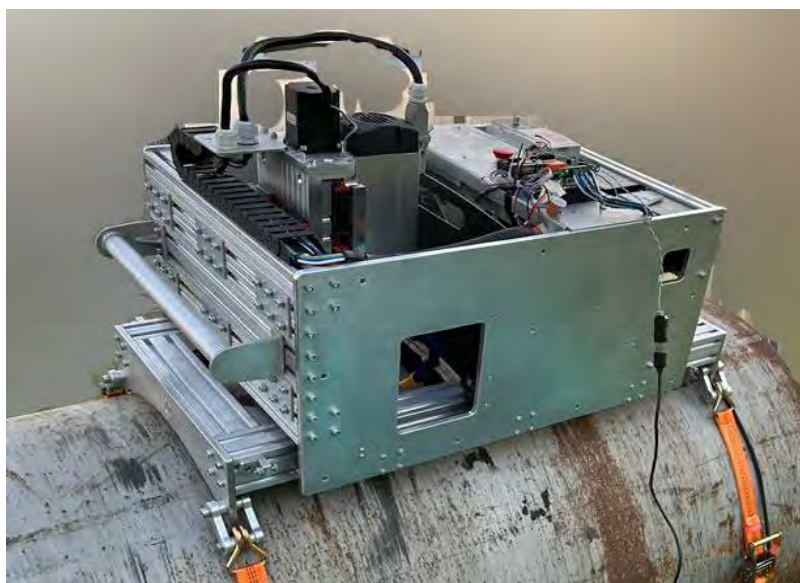
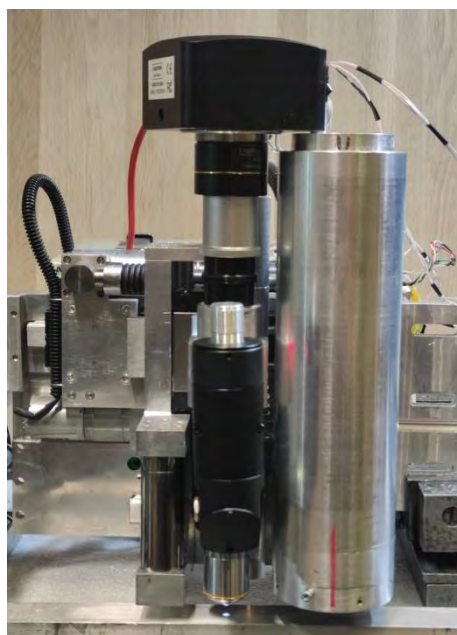


Рис. 2. Диагностический комплекс «MicroLab-Z2»

Он имеет два функциональных блока: блок подготовки поверхности (рис. 3, а) и исследовательский блок (рис. 3, б).



а



б

Рис. 3. Функциональные блоки диагностического комплекса «MicroLab-Z2»: а – блок подготовки поверхности; б – исследовательский блок

Блок подготовки поверхности позволяет в автоматизированном режиме, в любом пространственном положении, без применения СОЖ, за время не превышающее 15 минут, обеспечить подготовку площадки для исследований размером около 20х40 мм. Снятие поверхности выполняется с точностью до 1 мкм, а максимальная глубина снятия составляет 8 мм. Экспериментально было установлено, что при реализуемой таким образом подготовке обеспечивается минимальная величина механического наклепа (не превышающая вносимую при лабораторной подготовке), а также плоскостность поверхности и ее шероховатость, удовлетворяющая требованиям ГОСТ 9450, ГОСТ 5640.

Исследовательский блок представляет собой платформу, на которой установлены металлографический микроскоп и портативный микротвердомер. Микроскоп имеет увеличение до $\times 1000$, а также оснащен окуляром с возможностью фото- и видеофиксации изображения. Установленный на платформе портативный микротвердомер позволяет в автоматизированном режиме в любом пространственном положении выполнять микроиндентирование и измерение значений микротвердости при нагрузке на индентор $0 \div 0,1$ Н. Микроскоп и микротвердомер могут автоматически позиционироваться в одну и ту же точку, что позволяет оптически исследовать поверхность, выбирать подходящие места для индентирования, а затем анализировать полученные отпечатки. Сравнительные испытания показали, что данные, получаемые с исследовательского блока, по точности не уступают стационарному оборудованию.

С использованием диагностического комплекса «MicroLab-Z2» может быть получена следующая информация:

1. Оценка загрязненности металла неметаллическими включениями выполняется в соответствии с ГОСТ 1778 как при изучении поверхности конструкции, так и в зоне дефектов, или на торцевой части конструкции.

2. Оценка параметров структуры основного металла и сварных соединений выполняется в соответствии с ГОСТ 5639, ГОСТ 5640, ГОСТ 8233 при анализе протравленной поверхности. Для идентификации трудноразличимых структурных составляющих (мартенсит, верхний/нижний бейнит и т. д.) используется измерение значений микротвердости в этих зонах.

3. Оценка величины наклепа металла определяется по результатам измерения значений микротвердости в соответствии с ГОСТ 9450.

4. Оценка степени «охрупчивания» металла проводится по специально разработанной методике: по результатам анализа морфологии локализованных сдвигов рядом с отпечатком при микроиндентировании. Данный эффект отражает влияние различных видов упрочнения металла на механизм его пластической деформации (то есть переход от однородной пластической деформации к локализованной и последующему разрушению). Для хрупких материалов степень «охрупчивания» может оцениваться по различным существующим методикам обработки условий получения и параметров трещин рядом с отпечатком.

5. Оценка протекания процессов старения металла может быть выполнена как при анализе структуры металла по появлению характерных выделений на границах зерен, так и по снижению значений микротвердости структурных составляющих, относительно базового состояния (это более точный способ).

На третьем этапе полученные данные обрабатываются и переводятся разработанной нейросетью в фактические свойства металла. Такой подход применим как к основному металлу, так и к сварным соединениям.

С точки зрения возможных областей применения представленной технологии можно выделить следующие. Во-первых, при выполнении выборочных или капитальных ремонтов, где можно добиться существенного сокращения замены дефектных участков за счет снижения коэффициентов запаса при выполнении расчетов и за счет использования фактических механических свойств металла. Во-вторых, при выполнении экспертизы промышленной безопасности объектов, когда знание фактического состояния металла позволит обоснованно продлить срок службы объектов, выработавших свой ресурс, при сохранении требуемого уровня их надежности. В-третьих, это входной контроль, где оценка металлургического качества и фактических свойств металла позволит избежать поступления бракованной или контрафактной продукции. В-четвертых, это контроль сварных соединений, которые выделены в отдельную группу, поскольку имеют самое нестабильное состояние и свойства и нуждаются в дополнительном контроле.

Контакты:

zorinae86@rambler.ru (Зорин Александр Евгеньевич).