

ДИАГНОСТИЧЕСКИЙ КОМПЛЕКС «MicroLab-Z2» ДЛЯ НЕРАЗРУШАЮЩЕЙ ОЦЕНКИ СТРУКТУРНО-ДЕФОРМАЦИОННЫХ ПАРАМЕТРОВ МЕТАЛЛА КОНСТРУКЦИЙ

© 2024 г. А.Е. Зорин^{1,*}, В.И. Красненьков^{2,**}

¹ФГБОУ ВО «УГТУ», Россия 169300 Ухта, ул. Первомайская, 13

²ООО «ОМИКОН Текнолджис», Россия, Москва, ул. Маршала Соколовского, 10, корп.1

E-mail: *zorinae86@rambler.ru; **info@omicon-tech.ru

Поступила в редакцию 09.11.2023; после доработки 11.12.2023

Принята к публикации 15.12.2023

Поведение конструкции при воздействии внешних факторов определяется тремя ключевыми группами параметров строения ее металла (химических, структурных и деформационных). Получение информации о данных параметрах непосредственно на конструкции позволит эффективно решить задачу оценки ее фактического технического состояния. Задача неразрушающей оценки химического состава металла решается использованием портативных спектрометров. Для оценки двух других групп параметров разработан диагностический комплекс MicroLab-Z2. Он имеет два функциональных блока. Блок подготовки поверхности обеспечивает формирование на поверхности изделия площадки с шероховатостью, плоскостностью и уровнем вносимого механического наклепа, соответствующим лабораторной подготовке металлографических шлифов. Исследовательский блок представляет собой платформу, на которой установлены металлографический микроскоп и портативный микротвердомер. Он позволяет в любом пространственном положении выполнять металлографические исследования с увеличением до $\times 1000$, поверхностное микроиндентирование, измерение значений микротвердости при нагрузке 0—200 гс и оптическое изучение морфологии отпечатков. Достоверность данных, получаемых диагностическим комплексом MicroLab-Z2, подтверждена в ходе проведения сравнительных испытаний со стационарным оборудованием. С помощью разработанного устройства может быть выполнена оценка параметров структуры и загрязненности металла неметаллическими включениями, оценка степени упрочнения и охрупчивания металла, обнаружение процессов старения. Использование диагностического комплекса MicroLab-Z2 для оперативной неразрушающей оценки структурно-деформационных параметров металла конструкций позволит выйти на качественно иной уровень эффективности выполнения производственного и входного контроля выпускаемой продукции, оценки ремонтнопригодности дефектов, планирования ремонтных работ и других компенсирующих мероприятий, экспертизы промышленной безопасности.

Ключевые слова: оперативная диагностика металла, диагностический комплекс MicroLab-Z2, неразрушающая оценка состояния металла, подготовка поверхности металла, микротвердость, микроиндентирование, структура металла, деформационные параметры металла, охрупчивание металла, упрочнение металла, оценка фактического технического состояния.

DIAGNOSTIC COMPLEX «MicroLab-Z2» FOR NON-DESTRUCTIVE EVALUATION OF STRUCTURAL AND DEFORMATION PARAMETERS OF METAL CONSTRUCTIONS

A.E. Zorin^{1,*}, V.I. Krasnenkov^{2,**}

¹UGTU, Russia 169300 Ukhta, Pervomaiskaya str., 13

²OMICON Technologies LLC, Russia Moscow, Marshal Sokolovsky str., 10, building 1

E-mail: *zorinae86@rambler.ru; **info@omicon-tech.ru

The behavior of the construction under the influence of external factors is determined by three key groups of parameters of the metal composition (chemical, structural and deformation). Obtaining information about these parameters directly on the construction will effectively solve the problem of assessing its actual technical condition. The problem of non-destructive evaluation of the chemical composition of a metal is solved using portable spectrometers. The MicroLab-Z2 diagnostic complex has been developed to evaluate the other two groups of parameters. It has two functional blocks. The surface preparation unit ensures that the surface of the construction site has a roughness, flatness and level of applied mechanical hardening corresponding to the laboratory preparation of metallographic grinds. The research unit is a platform on which a metallographic microscope and a portable microhardness tester are installed. It allows metallographic researches with magnification up to $\times 1000$, surface microindentation, measurement of microhardness values at load of 0—200 gs and optical study of the morphology of imprints in any spatial position. The reliability of the data obtained by the MicroLab-Z2 diagnostic complex has been confirmed during comparative tests with stationary equipment. With the help of the developed device, an assessment of the structure parameters, contamination of metal with non-metallic inclusions, assessment of the degree of hardening and embrittlement of metal, detection of aging processes can be performed. The use of the MicroLab-Z2 diagnostic complex for operational non-destructive evaluation of structural and deformation parameters of metal constructions will allow us to reach a qualitatively different level of efficiency in performing production and input control of manufactured products, assessing the maintainability of defects, planning repairs and other compensating measures, and industrial safety expertise.

Keywords: operational diagnostics of metal, MicroLab-Z2 diagnostic complex, non-destructive assessment of metal condition, metal surface preparation, microhardness, microindentation, metal structure, deformation parameters of metal, embrittlement of metal, metal hardening, assessment of the actual technical condition.

DOI: 10.31857/S0130308224010071

ВВЕДЕНИЕ

В процессе производства и эксплуатации ответственных металлических конструкций возникает необходимость оперативного контроля состояния их металла.

При изготовлении требуемые характеристики металла конструкции достигаются за счет строгого соблюдения всех технологических операций. Даже самые незначительные отступления от оптимальных режимов и технологий производства могут критическим образом сказаться на качестве изделия и даже целой партии. Как следствие, добиться стабильных и гарантированных свойств металла однотипных конструкций не удастся. Находясь в пределах допустимых значений, они могут отличаться до 30—50 % и более в разных партиях [1—3]. С такой неопределенностью изделие поступает к заказчику и в ряде случаев может не обеспечить требуемую несущую способность или долговечность, нанеся в результате репутационные и финансовые потери производителю.

Эксплуатация также вносит свой вклад. Непроектные, циклические нагрузки, воздействие агрессивных сред, высоких и низких температур, появление дополнительных концентраторов напряжения могут привести к развитию негативных процессов в металле, снизив его работоспособность до критического уровня [4—6]. Как следствие, затрудняется принятие эффективных решений по ремонтно-техническому обслуживанию опасных производственных объектов, снижается достоверность прогнозирования их надежности и безопасности.

Известно, что поведение металла под действием внешних факторов определяется тремя ключевыми группами параметров его строения [7—11]:

- химических: содержание легирующих и микролегирующих элементов, вредных примесей (сера, фосфор) и т.д.;
- структурных: тип, параметры структуры, параметры неметаллических включений, ликвации хрупких фаз, микронесплошности и т.д.;
- деформационных: совокупный уровень упрочнения металла (дислокационного, твердорастворного, зернограницного и дисперстного) и его влияние на механизм и предельный уровень пластической деформации металла.

Т.е. комбинация представленных параметров оказывает определяющее влияние как на формирование механических свойств металла, так и на поведение реальной конструкции при эксплуатационных воздействиях.

В результате, получением данной информации может быть эффективно решены задачи достоверной оценки качества производимой продукции и ее фактического технического состояния в процессе эксплуатации.

До настоящего времени такой подход не находил практического развития, поскольку используемые для получения указанной информации методы и технологии должны быть оперативными и неразрушающими.

Оперативная неразрушающая оценка химического состава металла может быть выполнена с использованием разнообразных портативных оптико-эмиссионных или рентгенофлюоресцентных спектрометров, точность которых не уступает стационарному оборудованию [12].

Однако с определением двух других групп параметров (структурных и деформационных) до настоящего времени были сложности.

Целью настоящей работы являлась разработка диагностического комплекса MicroLab-Z2, позволяющего выполнять оперативную неразрушающую оценку структурно-деформационных параметров металла непосредственно на эксплуатируемой конструкции, без необходимости вывода ее из эксплуатации.

ОПИСАНИЕ ДИАГНОСТИЧЕСКОГО КОМПЛЕКСА И ЕГО ХАРАКТЕРИСТИКИ

Общий вид диагностического комплекса MicroLab-Z2 приведен на рис. 1, а его основные технические характеристики — в табл. 1.

Диагностический комплекс имеет два функциональных блока: блок подготовки поверхности и исследовательский блок.

Блок подготовки поверхности представляет собой шпиндель мощностью 2,2 кВт, со скоростью

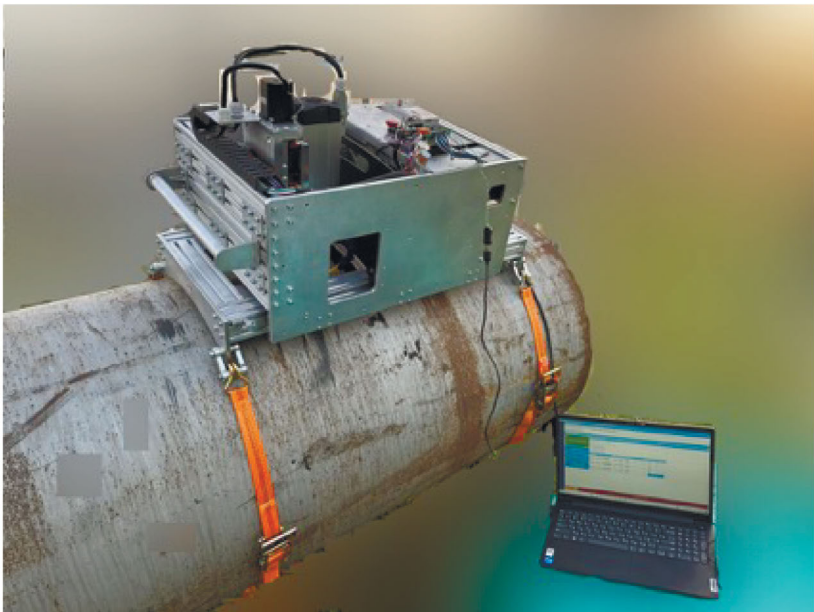


Рис. 1. Общий вид диагностического комплекса MicroLab-Z2.

Таблица 1

Основные технические характеристики диагностического комплекса MicroLab-Z2

№ п/п	Характеристика	Значение
1	Габаритные размеры (Д×Ш×В)	850×500×450 мм
2	Вес	42 кг
3	Питание	От сети/генератора 220 В
4	Допустимая температура эксплуатации	–20 — +50°С
5	Допустимое пространственное положение при работе	0 — 360°
6	Время подготовки поверхности	15 мин
7	Минимальный шаг снятия поверхности при подготовке	1 мкм
8	Максимальная глубина снятия поверхности при подготовке	8 мм
9	Шероховатость подготавливаемой поверхности	до Ra < 0,2
10	Точность выбора места для индентирования	1 мкм
11	Диапазон нагрузок на индентор	0 — 200 гс
12	Увеличение микроскопа	×50 — ×1000
13	Возможность фото/видеофиксации изображения	Да

вращения до 18000 об/мин и автоматизированным координатным перемещением по трем осям с точностью до 1 мкм (рис. 2).

Программа управления блоком подготовки поверхности позволяет задавать: координаты перемещения шпинделя; скорость перемещения и вращения шпинделя; алгоритм подготовки поверхности (количество проходов на одной глубине, глубину снимаемого слоя за 1 проход и общую и т.д.).

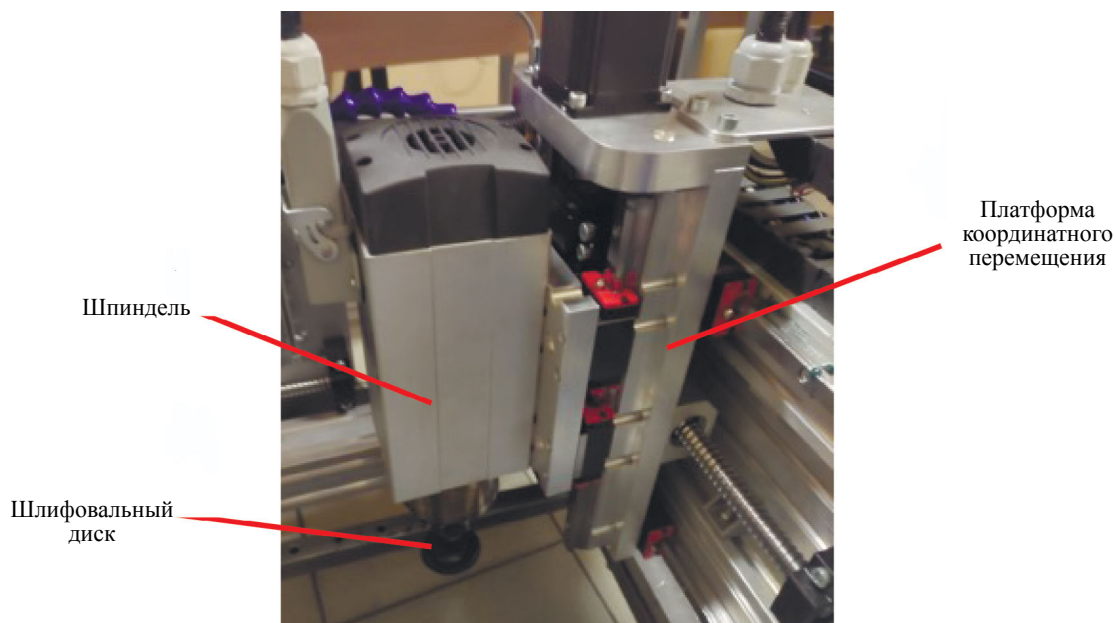


Рис. 2. Блок подготовки поверхности диагностического комплекса MicroLab-Z2.

Смена шлифовального/полировального инструмента производится вручную через специальное технологическое окно в корпусе. Через него же можно наблюдать за процессом подготовки поверхности, контролировать ее качество, а также выполнять травление отполированного металла.

Для проведения высокоточных исследований поверхности ее подготовка должна обеспечивать:

- минимизацию величины механического наклепа;
- формирование плоской площадки на определенной толщине изделия;
- формирование требуемой шероховатости ($Ra < 0,32$ мкм).

Соблюдение данных требований достигается следующей последовательностью подготовки поверхности:

1. Шлифовка с использованием шлифовального круга 3М Cubitron II зернистостью Р60 в 3 прохода.
 2. Грубая полировка с использованием войлочного круга и пасты Magpol C94 в три прохода.
 3. Финишная полировка с использованием войлочного круга и пасты Magpol F62 в три прохода.
- Общий вид получаемой при этом площадки на поверхности трубы Ду 830 мм представлен на рис. 3.



Рис. 3. Общий вид подготавливаемой площадки на поверхности трубы Ду 830 мм.

При необходимости выполнения исследований на определенной глубине предварительно выполняется снятие нужной толщины металла с шагом до 0,5 мм за каждый проход.

Время подготовки поверхности по указанной технологии составляет не более 15 мин.

Для оценки качества подготавливаемой поверхности по вышеуказанной технологии были проведены тестовые испытания на темплете трубы стали 17Г1С диаметром 1220 мм.

Величина вносимого наклепа оценивалась проведением сравнительных замеров микротвердости поверхности темплета, подготовленной с использованием диагностического комплекса MicroLab-Z2, и по технологии лабораторной подготовки на шлифовально-полировальном станке Struers TegraPol:

- грубая шлифовка абразивным кругом в воде;
- тонкая шлифовка шлифовальной бумагой зернистостью P36/80/240/320 в воде;
- полировка в воде фетровым диском и алмазной суспензией с размером частиц 9/3/1 мкм.

Измерения значений микротвердости выполнялись при нагрузке в 50 гс на стационарном микротвердомере ПМТ-3М в соответствии с ГОСТ 9450—75 [13]. В обоих случаях наносилось по 30 отпечатков.

Среднее значение микротвердости на поверхности, подготовленной в лабораторных условиях, составило 167 кгс/мм², а разброс значений — от 141 до 188 кгс/мм². Среднее значение микротвердости на поверхности, подготовленной с использованием диагностического комплекса MicroLab-Z2, составило 165 кгс/мм², с разбросом — от 147 до 190 кгс/мм².

Таким образом, учитывая, что метод измерения микротвердости является чрезвычайно чувствительным к состоянию металла [14, 15], полученные результаты свидетельствуют о том, что величина наклепа, создаваемая на поверхности при шлифовке и полировке с использованием диагностического комплекса MicroLab-Z2, не превосходит величину наклепа, создаваемую при лабораторной подготовке образцов. Разница в разбросе значений микротвердости в данном случае может быть объяснена структурно-механической неоднородностью металла трубы по объему.

Контроль плоскостности поверхности выполнялся индикатором часового типа с чувствительностью в 1 мкм, установленным на станок ЧПУ с высокоточным перемещением по координатным осям. Подготовленная площадка размером 40×40 мм на вышеописанном темплете трубы сканировалась по сетке с шагом в 5 мм.

Измерения показали, что максимальное отклонение от горизонтальной плоскости по всей длине и ширине исследованной поверхности не превышает 2 мкм, причем данная погрешность накапливается плавно, без скачков и провалов внутри анализируемой площади.

Шероховатость поверхности контролировалась цифровым измерителем шероховатости Elcometer 7060 SurfTest SJ-201P. Усредненные данные 10 замеров в различных участках подготовленной площадки показали значение $R_a = 0,18$ мкм.

Важно отметить, что процесс подготовки поверхности с использованием диагностического комплекса MicroLab-Z2 может выполняться в любом пространственном положении и не предусматривает использования смазывающе-охлаждающей жидкости (СОЖ), что делает его удобным и приспособленным к производственным и полевым условиям. А высокая точность координатного перемещения дает возможность контролировать остаточную толщину изделия и не выходить за пределы ее минусового допуска (при подготовке бездефектной зоны металла).

Исследовательский блок представляет собой платформу, на которой установлены металлографический микроскоп и портативный микротвердомер (рис. 4). Как и блок подготовки поверхности, платформа имеет программное управление и обеспечивает координатное перемещение установленных на ней устройств по трем осям с точностью до 1 мкм.

Металлографический микроскоп имеет увеличение до $\times 1000$ и оснащен окуляром с возможностью фото- и видеофиксации изображения.

Благодаря качеству подготовки получаемое изображение протравленной и непротравленной поверхности не уступает получаемому в стационарных условиях при изучении лабораторных металлографических шлифов (рис. 5).

Оптический анализ изображения также возможен в любом пространственном положении.

Установленный на исследовательской платформе портативный микротвердомер является запатентованным устройством [16], позволяющим в автоматизированном режиме в любом пространственном положении выполнять микроиндентирование и измерение значений микротвердости в диапазоне нагрузок на индентор 0 — 200 гс. Программные настройки позволяют регулировать такие параметры микроиндентирования, как величина усилия на индентор, скорость набора, время выдержки и скорость снятия нагрузки.

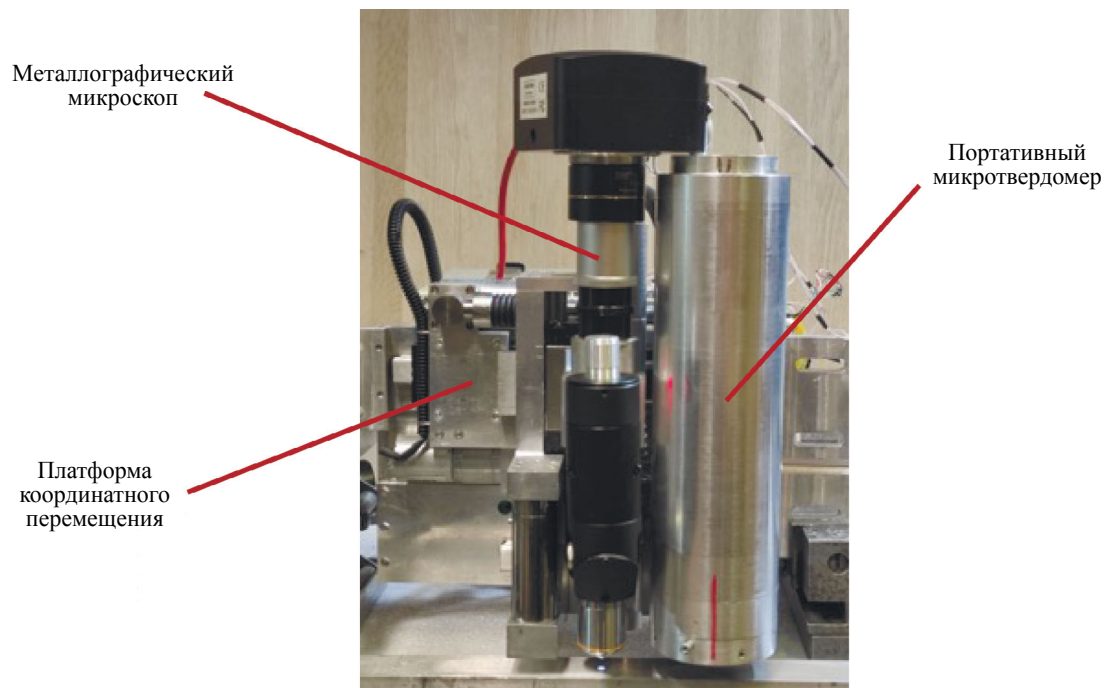
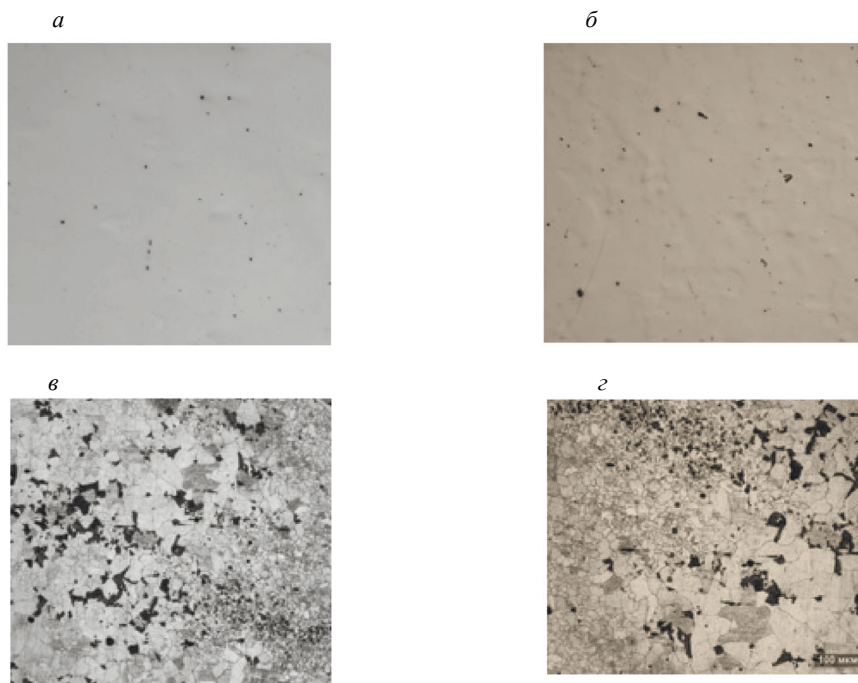


Рис. 4. Исследовательский блок.

Рис. 5. Изображение поверхности листа из стали 09Г2С ($\times 200$):

а, в — соответственно изображение нетравленной и травленной поверхности, полученное на микроскопе диагностического комплекса MicroLab-Z2; *б, г* — соответственно изображение нетравленной и травленной поверхности, полученное на стационарном микроскопе NIKON MA200.

Данный прибор является глубоко модернизированной версией прототипа [17].

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.

Возможность выполнения измерений микротвердости в любом пространственном положении обеспечивается за счет прецизионной механической балансировки подвижных элементов микротвердомера.

Задание нагрузки на индентор производится в два этапа. Сначала подается незначительная ее часть (около 5 % от плановой) для достижения контакта индентора с поверхностью, а при программной идентификации данного контакта подается основная часть усилия. Такой подход позволяет нивелировать погрешности, связанные с температурным расширением элементов микротвердомера, влияющие на абсолютные показания индукционного датчика, но не влияющие на разность показаний в момент касания поверхности и полного погружения индентора.

Для оценки точности и достоверности получаемых с использованием портативного микротвердомера значений были проведены комплексные испытания.

На первом этапе проводилась серия измерений на кристалле поваренной соли NaCl, характеризующейся стабильными значениями микротвердости и используемой для проверки стационарных микротвердомеров.

В соответствии с существующей методикой проверки были выполнены серии из 10 замеров микротвердости при нагрузке в 10 и 20 гс.

Полученные результаты показали, что во всех случаях значения микротвердости лежали в допустимом диапазоне значений 19—21 кгс/мм². Среднеквадратичное отклонение при нагрузке в 10 гс составило 0,29 кгс/мм², а при нагрузке в 20 гс — 0,17 кгс/мм², что существенно ниже допустимого значения в 0,45 кгс/мм².

На втором этапе проводились сравнительные испытания микротвердомера диагностического комплекса MicroLab-Z2 и стационарного микротвердомера ПМТ-3М на мере микротвердости МТВ-МЕТ.

Выполнялось по 30 измерений при нагрузках в 10, 30 и 50 гс.

Полученные результаты, представленные на рис. 6, показали, что разброс значений микротвердости, получаемых с использованием разработанного портативного микротвердомера, не только существенно ниже полученного на микротвердомере ПМТ-3М, но и находится в районе допустимых размахов случайной погрешности значений самой меры микротвердости МТВ-МЕТ (7 % при нагрузке в 10 гс и 5 % при нагрузке в 30 и 50 гс).

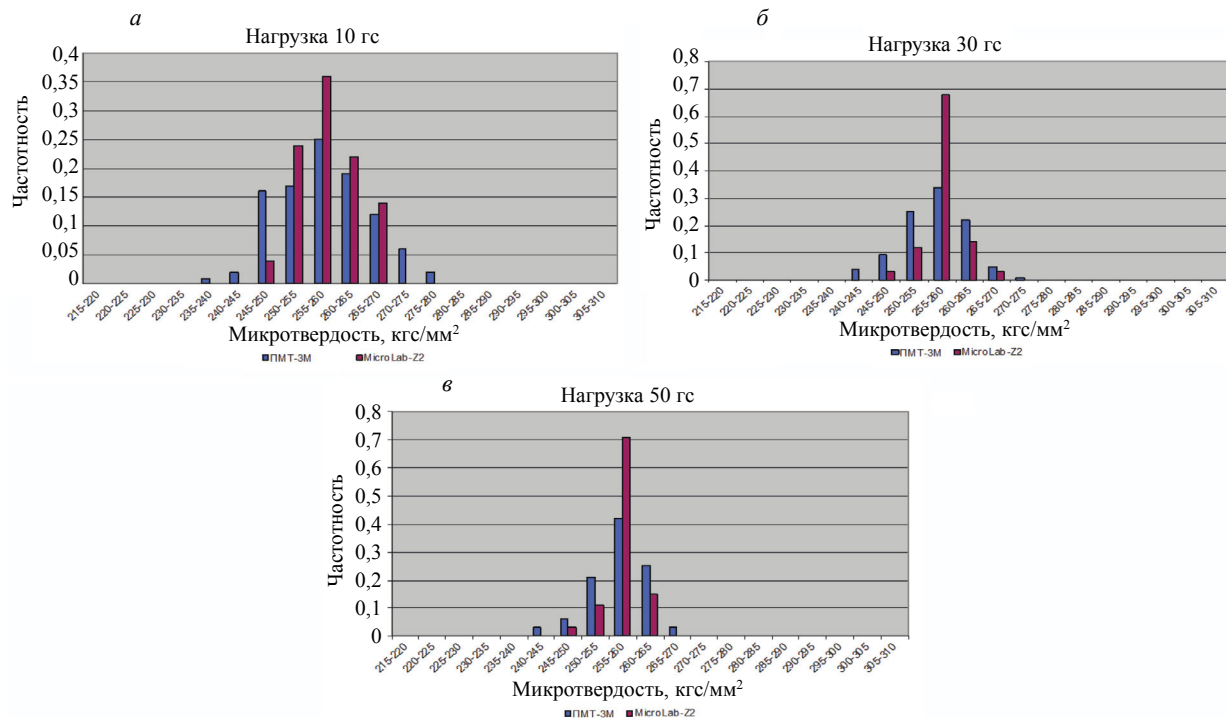


Рис. 6. Сравнительные гистограммы значений микротвердости, полученные с использованием микротвердомера диагностического комплекса MicroLab-Z2 и стационарного микротвердомера ПМТ-3М на мере микротвердости МТВ-МЕТ:

а — при нагрузке 10 гс; б — при нагрузке 30 гс; в — при нагрузке 50 гс.

Таким образом, диагностический комплекс MicroLab-Z2 представляет собой устройство, позволяющее с лабораторным качеством и точностью выполнять подготовку поверхности, ее металлографический анализ, измерение значений микротвердости и оптическое изучение морфологии отпечатков.

Важно отметить, что диагностический комплекс MicroLab-Z2 оснащен датчиками температуры и вибрации, что позволяет в режиме реального времени контролировать значения указанных параметров на всех этапах исследований и не допускать их влияния на получаемые результаты.

РЕШАЕМЫЕ ЗАДАЧИ

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

- оценка загрязненности металла неметаллическими включениями по ГОСТ 1778—2022 [18];
- оценка параметров структуры основного металла и сварных соединений по ГОСТ 5639—82 [19], ГОСТ 5640—2020 [20], ГОСТ 8233—56 [21]. Для идентификации трудно различимых структурных составляющих (мартенсит, верхний/нижний бейнит и т.д.) используется измерение значений микротвердости в этих зонах;
- оценка величины наклепа металла по результатам сравнения значений микротвердости, полученных на анализируемой конструкции, со значениями, полученными на аналогичной конструкции в исходном состоянии. Либо при сравнении значений микротвердости различных зон металла конструкции (по площади или по толщине);
- оценка степени охрупчивания металла. Для пластичных металлов (сталей) степень охрупчивания определяется по специально разработанной методике [22]: по результатам анализа морфологии локализованных сдвигов рядом с отпечатком при микроиндентировании (рис. 7). Данный эффект отражает влияние различных видов упрочнения металла (дислокационного, зернограницного, дисперсного, твердорастворного) на механизм его пластической деформации: переход от однородной пластической деформации к локализованной и последующему разрушению. Для хрупких материалов степень охрупчивания может оцениваться по различным существующим методикам обработки длины, количества, морфологии трещин рядом с отпечатком, по нагрузке, приводящей к трещинообразованию, и т.д. [23—28];

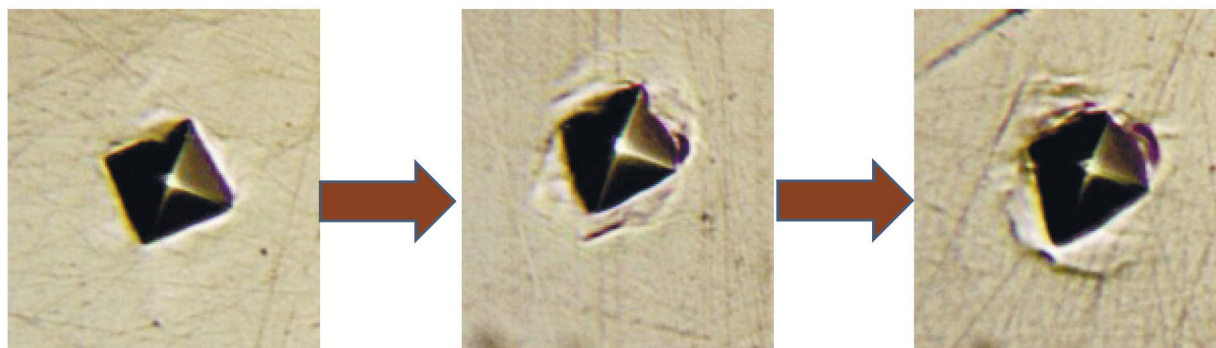


Рис. 7. Различная морфология локализованных сдвигов металла рядом с отпечатком при микроиндентировании (переход от однородной пластической деформации к локализованной).

– оценка протекания процессов старения металла. Может быть выполнена в ходе металлографического анализа структуры металла, по появлению характерных выделений на границах зерен (рис. 8) или более точно: по снижению значений микротвердости соответствующих структурных составляющих в анализируемом состоянии металла конструкции относительно базового [29].

Вышеуказанная информация может быть использована в рамках следующих работ:

1. *Выполнения входного или производственного контроля.* К примеру, проведение исследований на наружной или торцевой поверхности труб позволит формировать категории труб с повышенным металлургическим качеством, либо наоборот, выявлять продукцию с потенциально низкими механическими свойствами, металл которой целесообразно подвергнуть разрушающим испытаниям.

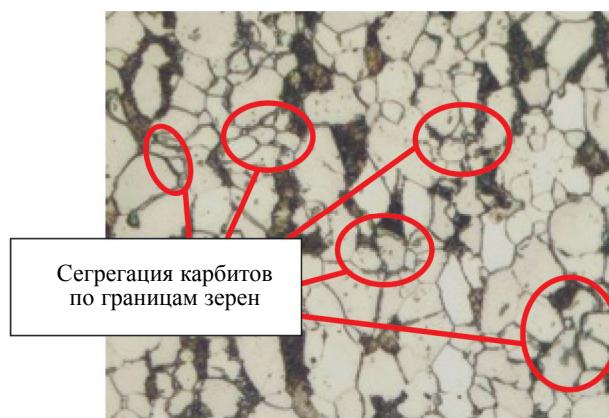


Рис. 8. Выделение карбидов по границам зерен феррита в результате старения стали 20 (увеличение $\times 200$).

2. *Выполнения выборочного или капитального ремонта.* В частности, исследование состояния металла в дефектной зоне позволит обоснованно снижать коэффициенты запаса в рамках проведения расчетов на прочность и долговечность, что приведет к повышению эффективности выполнения ремонтных работ. Отдельно можно отметить перспективы ремонта трещин методом вышлифовки. В настоящее время трещины устраняются преимущественно путем вырезки, поскольку при вышлифовке в полевых условиях с использованием ручного оборудования нет возможности гарантировать полное устранение дефекта, а кроме того, нет возможности оценить состояние металла в дефектной зоне. В данном случае это является принципиально важным, поскольку зарождение трещины свидетельствует об исчерпании металлом запаса пластичности. Использование диагностического комплекса MicroLab-Z2 позволит контролировать полное устранение дефекта (посредством микроскопического анализа отполированной поверхности), а также оценить степень охрупчивания металла в зоне вышлифовки (путем выполнения микроиндентирования). Наличие различных нежелательных параметров структуры (микропор, микротрещин, закалочных структур и т.д.), а также высокая степень упрочнения и охрупчивания металла в зоне дефекта не позволит качественно отремонтировать его с использованием метода заварки. Соответственно, оценка структурно-деформационных параметров в зоне дефекта с использованием MicroLab-Z2 позволит расширить возможность использования данного метода ремонта.

3. *Выполнения экспертизы промышленной безопасности.* Предварительное установление эмпирической взаимосвязи между структурно-химическими и деформационными параметрами металла, а также его механическими свойствами, используемыми в расчетах остаточного ресурса конструкции, позволит по результатам проводимых обследований уточнить фактические механические свойства металла конструкции и вывести на качественно иной уровень достоверность прогнозирования срока ее безопасной эксплуатации.

В полевых условиях в подавляющем большинстве случаев исследования могут быть проведены только с наружной поверхности конструкции. Учитывая, что, как правило, там фиксируются максимальные напряжения, преимущественное протекание деградиационных процессов и зарождение различных дефектов [30, 31], данные, полученные с поверхности (либо при анализе дефектной зоны — в зоне максимальной глубины дефекта), будут являться наиболее информативными.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Как на этапе производства, так и в процессе эксплуатации ответственных металлоконструкций, оперативный контроль состояния металла является чрезвычайно важной задачей. Применение для этой цели представленного диагностического комплекса MicroLab-Z2 целесообразно, поскольку:

- обеспечивается возможность проведения оперативной неразрушающей оценки ключевых структурно-деформационных параметров металла конструкций в различных, в том числе дефектных зонах, без необходимости вывода конструкции из эксплуатации и вырезки из нее образцов;

- благодаря автоматизированному прецизионному координатному перемещению элементов, входящих в диагностический комплекс, обеспечивается высокая точность управления глубиной снимаемого слоя поверхности;
- качество подготовки поверхности, а также достоверность получаемых данных микроскопии и микроиндентирования не уступают результатам, получаемым в лабораторных условиях с применением стационарного оборудования;
- все подготовительные и исследовательские операции могут выполняться в любом пространственном положении.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Лисин Ю.В. Трубы держат давление // Трубопроводный транспорт нефти. 2015. № 8. С. 5—14.
2. Мишетьян А.Р., Шабалов И.П., Чевская О.Н., Филиппов Г.А. Влияние условий трубного передела и структурного состояния на эксплуатационную надежность высокопрочных трубных сталей // Черная металлургия. Бюллетень научно-технической информации. 2021. Т. 77. № 4. С. 455—463.
3. Хлыбов О.С. Прогноз и управление механическими свойствами проката методами вероятностно-го моделирования // Металлург. 2020. № 4. С. 71—74.
4. Лисин Ю.В., Неганов Д.А., Суриков В.И., Гумеров К.М. Исследования изменений свойств металла трубопроводов в процессе эксплуатации: обобщение результатов и перспективные разработки Уфимской научной школы // Наука и технологии трубопроводного транспорта нефти и нефтепродуктов. 2017. Т. 7. № 2. С. 22—30.
5. Япчигулов Р.С., Алабердин И.Р. Изучение деградации механических свойств труб магистрального газопровода // Газовая промышленность. 2021. № 1 (811). С. 90—93.
6. Скородумов С.В., Неганов Д.А., Студёнов Е.П., Пошибаев П.В., Никитин Н.Ю. Статистический анализ результатов механических испытаний металла и труб магистральных трубопроводов // Заводская лаборатория. Диагностика материалов. 2022. Т. 88. № 1—1. С. 82—91.
7. Гольдштейн М.И., Фарбер В.М. Дисперсионное упрочнение стали. М.: Металлургия, 1979. 208 с.
8. Шмитт-Томас К.Г. Металловедение для машиностроения / Справочник. М.: Металлургия, 1995. 511 с.
9. Лаврентьев А.А., Ильин А.В. Трещиностойкость высокопрочных среднелегированных сталей и ее связь с характеристиками структуры металла / В сборнике: Приложение к журналу. Вестник Тамбовского университета. Сер. «Естественные и технические науки». Тамбов, 2018. С. 152—156.
10. Сыч О.В., Хлусова Е.И. Взаимосвязь параметров структуры с характеристиками работоспособности судостроительных сталей различного легирования // Вопросы материаловедения. 2020. № 4 (104). С. 17—31.
11. Гетманова М.Е., Ливанова О.В., Филиппов Г.А., Яндимиров А.А., Сухов А.В. Структурная неоднородность и вязкость разрушения колесной стали // Деформация и разрушение материалов. 2006. № 12. С. 32—37.
12. Зорин А.Е. Неразрушающая оценка механических характеристик металла ответственных конструкций на основании анализа его ключевых структурно-химических и деформационных параметров // Наука и технологии трубопроводного транспорта нефти и нефтепродуктов. 2023. Т.13. № 5. С. 402—410.
13. ГОСТ 9450—75 Измерение микротвердости вдавливанием алмазных наконечников.
14. Григорович В.К. Твердость и микротвердость металлов. М.: Наука, 1976. 232 с.
15. Хрущев М.М. Трение, износ и микротвердость материалов: Избранные работы. М.: КРАСАНД, 2012. 512 с.
16. Пат. 2738201 Российская Федерация СПК G01N 3/42 Портативный микротвердомер / А.Е. Зорин, С.Л. Виноградов; заявитель и патентообладатель ООО «ОМИКОН Текнолоджис»; заявл. 03.06.2020г., опубл. 09.12.2020г.
17. Зорин А.Е. Разработка портативного микротвердомера для выполнения неразрушающей оценки состояния металла газопроводов // Нефть, газ и бизнес. 2015. № 8. С. 35—38.
18. ГОСТ 1778—2022 Металлопродукция из сталей и сплавов. Металлографические методы определения неметаллических включений.
19. ГОСТ 5639—82 Стали и сплавы. Методы выявления и определения величины зерна.
20. ГОСТ 5640—2020 Сталь. Металлографический метод оценки микроструктуры проката стального плоского.
21. ГОСТ 8233—56 Сталь. Эталоны микроструктуры.
22. Зорин А.Е., Романцов А.С. Оценка охрупчивания конструкционных сталей методом микроиндентирования // Заводская лаборатория. Диагностика материалов. 2023. Т. 89. № 9. С. 64—72.
23. Bulatov M., Shatsov A., Grigirev N., Malkov N. Strenght, crack resistance and optical loses of heat-treated silica fibers coated with non-ferrous metal // Optical Fiber Technology. 2023. V. 75. Art.103174.

24. Henry R., Le Roux N., Zacharie-Aubrun I. Indentation cracking in mono and polycrystalline cubic zirconia: Methodology of an apparent fracture toughness evaluation // *Material Science and Engineering: A*. 2022. V. 860. Art. 144261.
25. Вабищевич С.А., Вабищевич Н.В., Бринкевич Д.И. Микропрочностные свойства имплантированных монокристаллов кремния // *Вестник Полоцкого государственного университета. Серия С. Фундаментальные науки*. 2012. № 12. С. 79—88.
26. Щербак Г.В., Мурашов А.А., Сметанин К.Е. Исследование анизотропии свойств режущей пластины, полученной по технологии керамической 3D-печати (LCM) из композита Al_2O_3/ZrO_2 (ZTA) // *Заводская лаборатория. Диагностика материалов*. 2021. Т. 87. № 11. С. 64—69.
27. Тюрин А.И., Поверина Г.В., Куприякин А.М. Влияние скорости относительной деформации на величину трещиностойкости Si и Ge при динамическом микроиндентировании // *Вестник Тамбовского университета. Серия: Естественные и технические науки*. 2007. Т. 12. № 1. С. 84—87.
28. Lube T. Fracture Toughness Measurement // *Encyclopedia of Materials: Technical Ceramics and Glasses*. 2021. V. 1. P. 762—774.
29. Зорин А.Е. Разработка способа качественной оценки технического состояния металла конструкций // *Территория «НЕФТЕГАЗ»*. 2015. № 9. С. 46—50.
30. Зорин А.Е. Об особенностях накопления повреждения металла газопроводов в процессе эксплуатации // *Нефть, газ и бизнес*. 2012. № 7. С. 69—71.
31. Казаков Ю.В., Зорин А.Е., Зорин Н.Е. Сопротивляемость газопроводов стресс-коррозионному разрушению // *Территория «НЕФТЕГАЗ»*. 2013. № 11. С. 46—50.

REFERENCES

1. Lisin Yu.V. Pipes keep pressure // *Pipeline transportation of oil*. 2015. No. 8. P. 5—14.
2. Mishetyan A.R., Shabalov I.P., Chevskaya O.N., Filippov G.A. Influence of pipe conversion conditions and structural condition on operational reliability of high-strength pipe steels // *Ferrous metallurgy. Bulletin of scientific and technical information*. 2021. V. 77. No. 4. P. 455—463.
3. Khlybov O.S. Prediction and control of mechanical properties of rolled products by probabilistic modeling methods // *Metallurg*. 2020. No. 4. P. 71—74.
4. Lisin Yu.V., Neganov D.A., Surikov V.I., Gumerov K.M. Studies of changes in the properties of pipeline metal during operation: generalization of results and promising developments of the Ufa Scientific school // *Science and technology of pipeline transport of oil and petroleum products*. 2017. V. 7. No. 2. P. 22—30.
5. Yarchigulov R.S., Alaberdin I.R. Studying the degradation of mechanical properties of pipes of the main gas pipeline // *Gas industry*. 2021. No. 1(811). P. 90—93.
6. Skorodumov S.V., Neganov D.A., Studenov E.P., Poshibaev P.V., Nikitin N.Yu. Statistical analysis of the results of mechanical tests of metal and pipes of main pipelines // *Factory laboratory. Diagnostics of materials*. 2022. V. 88. No. 1—1. P. 82—91.
7. Goldstein M.I., Farber V.M. Dispersion hardening of steel. M.: Metallurgy, 1979. 208 p.
8. Schmitt-Thomas K.G. Metallurgy for mechanical engineering. Handbook. M.: Metallurgy, 1995. 511 p.
9. Lavrentiev A.A., Ilyin A.V. Crack resistance of high-strength medium-alloy steels and its relation to the characteristics of the metal structure / In the collection: An appendix to the journal. *Bulletin of Tambov University. Ser. "Natural and technical sciences"* Tambov, 2018. P. 152—156.
10. Sych O.V., Khlusova E.I. Relationship of structure parameters with performance characteristics of shipbuilding steels of various alloying // *Issues of materials science*. 2020. No. 4 (104). P. 17—31.
11. Getmanova M.E., Livanova O.V., Fillipov G.A., Yandimirov A.A., Sukhov A.V. Structural heterogeneity and fracture toughness of wheel steel // *Deformation and destruction of materials*. 2006. No. 12. P. 32—37.
12. Zorin A.E. Non-destructive evaluation of the mechanical characteristics of metal of critical structures based on the analysis of its key structural, chemical and deformation parameters // *Science and technology of pipeline transport of oil and petroleum products*. 2023. V. 13. No. 5. P. 402—410.
13. GOST 9450—75 Measurement microhardness by indentation of diamond tips.
14. Grigorovich V.K. Hardness and microhardness of metals. M.: Nauka, 1976. 232 p.
15. Khrushchev M.M. Friction, wear and microhardness of materials: Selected works. M.: KRASAND, 2012. 512 p.
16. Pat. 2738201 Russian Federation SEC G01N 3/42 Portable microhardometer / A.E. Zorin, S.L. Vinogradov; applicant and patent holder of OMICON Technologies LLC; application 03.06.2020, publ. 09.12.2020.
17. Zorin A.E. Development of a portable microhardometer for performing non-destructive assessment of the state of metal of gas pipelines // *Oil, gas and business*. 2015. No. 8. P. 35—38.
18. GOST 1778-2022 Metal products made of steels and alloys. Metallographic methods for the determination of non-metallic inclusions.
19. GOST 5639—82 Steels and alloys. Methods for detecting and determining the grain size.
20. GOST 5640—2020 Steel. Metallographic method for evaluating the microstructure of rolled flat steel.
21. GOST 8233—56 Steel. Standards of microstructure.

22. Zorin A.E., Romantsov A.S. Evaluation of embrittlement of structural steels by microindentation method // *Zavodskaya lab. Diagnostics of materials*. 2023. V. 89. No. 9. P. 64—72.
23. Bulatov M., Shatsov A., Grigirev N., Malkov N. Strenght, crack resistance and optical loses of heat-treated silica fibers coated with non-ferrous metal // *Optical Fiber Technology*. V. 75. 2023. Art.103174.
24. Henry R., Le Roux N., Zacharie-Aubrun I. Indentation cracking in mono and polycrystalline cubic zirconia: Methodology of an apparent fracture toughness evaluation // *Material Science and Engineering: A*. V. 860. 2022. Art. 144261.
25. Vabishevich S.A., Vabishevich N.V., Brinkevich D.I. Microproof properties of implanted silicon single crystals // *Bulletin of the Polotsk State University. Series C. Fundamental Sciences*. 2012. No.12. P. 79—88.
26. Shcherbak G.V., Murashov A.A., Smetanin K.E. Investigation of the anisotropy of the properties of a cutting plate obtained using ceramic 3D printing (LCM) technology from an Al₂O₃/ZrO₂ composite (ZTA) // *Factory Laboratory. Diagnostics of materials*. 2021. V. 87. No. 11. P. 64—69.
27. Tyurin A.I., Povinova G.V., Kupriyakin A.M. The influence of the relative deformation rate on the crack resistance of Si and Ge during dynamic microindentation // *Bulletin of the Tambov University. Series: Natural and Technical Sciences*. 2007. V.12. No.1. P. 84—87.
28. Lube T. Fracture Toughness Measurement // *Encyclopedia of Materials: Technical Ceramics and Glasses*. 2021. V. 1. P. 762—774.
29. Zorin A.E. Development of a method for qualitative assessment of the technical condition of metal structures // *The territory of NEFTEGAZ*. 2015. No. 9. P. 46—50.
30. Zorin A.E. On the features of accumulation of metal damage to gas pipelines during operation // *Oil, gas and business*. 2012. No. 7. P. 69—71.
31. Kazakov Yu.V., Zorin A.E., Zorin N.E. Resistance of gas pipelines to stress-corrosion destruction // *The territory of NEFTEGAZ*. 2013. No. 11. P. 46—50.
-