

УДК 620.178.7:621.9.048

ЛАБОРАТОРНЫЙ КОМПЛЕКС ДЛЯ ИНСТРУМЕНТАЛЬНОГО
ИНДЕНТИРОВАНИЯ МАТЕРИАЛОВ

А. П. КРЕНЬ¹, О. В. МАЦУЛЕВИЧ¹, Т. А. ПРОТАСЕНЯ¹, Г. А. ЛАНЦМАН,¹
К. В. ПАНТЕЛЕЕВ², Р. И. ВОРОБЕЙ², В. А. МИКИТЕВИЧ²,
А. В. НИКИФОРОВ³

¹Институт прикладной физики НАН Беларуси

²Белорусский национальный технический университет

³Белорусский государственный университет

Минск, Беларусь

Обеспечение безопасности и оценка остаточного ресурса эксплуатируемых конструкций требуют методов контроля, не нарушающих их целостность. Традиционные разрушающие испытания неприменимы для таких объектов, как магистральные трубопроводы или элементы энергетических установок. Метод инструментального индентирования, позволяющий локально определять механические свойства материала непосредственно на объекте, является эффективным решением этой задачи [1, 2].

Метод основан на регистрации кривой «нагрузка – глубина внедрения» при вдавливании индентора известной геометрии (сфера, конус, пирамида) в поверхность материала. Анализ этой диаграммы по стандартным алгоритмам (например, ISO 14577) позволяет рассчитать ключевые механические свойства. На основе получаемых данных могут быть определены значения твердости, модуля упругости, пределов текучести и прочности, а также оценены параметры деформационного упрочнения, ползучести и релаксации (табл. 1). Метод является неразрушающим (глубина отпечатка ≤ 150 мкм) и позволяет проводить работы в полевых условиях.

Табл. 1. Технические характеристики измерительного комплекса

Параметр	Значение / Характеристика
Параметры установки	
Максимальная нагрузка	До 2000 Н
Максимальная глубина внедрения индентора	До 1 мм
Набор сменных инденторов	Сферические ($\varnothing 1; 2,5; 5$ мм), конические, пирамидальные
Точность измерения нагрузки	Относительная погрешность $\leq \pm 1$ %
Точность измерения перемещения	Абсолютная погрешность $\leq \pm 1$ мкм
Скорость нагружения	Регулировка в диапазоне 1...100 мкм/с
Диапазоны определяемых характеристик	
Твердость по Бринеллю (НВ)	100...450 НВ
Твердость по Роквеллу (HRC)	20...68 HRC
Модуль упругости (модуль Юнга)	70...200 ГПа
Предел прочности сталей перлитного класса*	380...1700 МПа
<i>Примечание</i> – Определяется пересчетом по эмпирическим зависимостям на основании измеренной твердости (в соответствии с СТБ 2495–2017)	

Разработанный комплекс (рис. 1) представляет собой интегрированное решение, включающее прецизионную механическую часть, электронный блок управления и специализированное программное обеспечение. Программное обеспечение обеспечивает управление процессом испытания, отображение диаграммы в реальном времени и автоматизированный анализ данных.

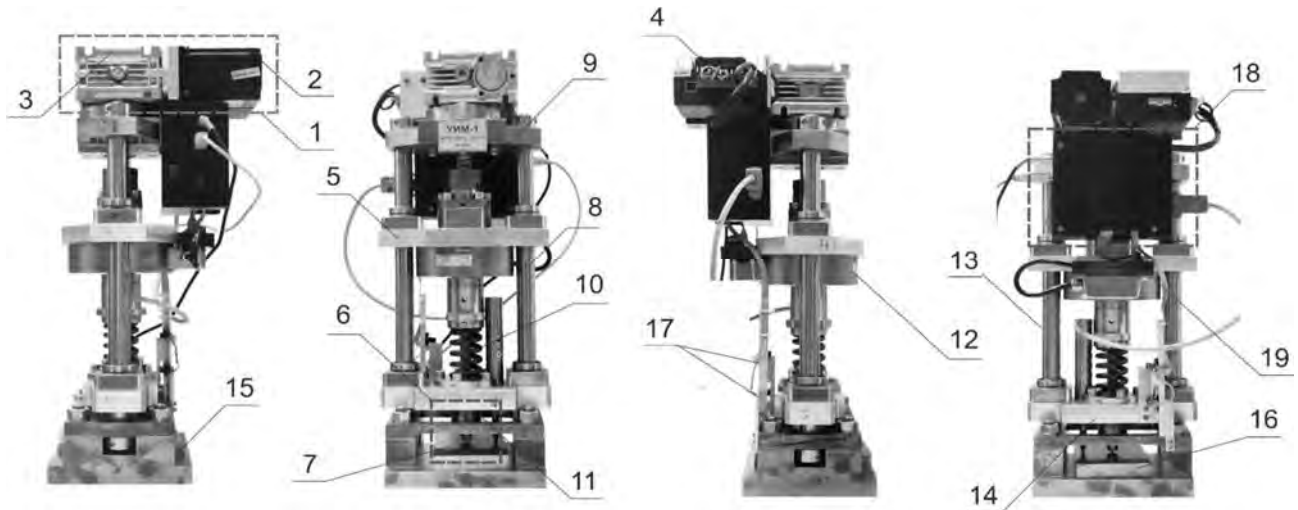


Рис. 1. Общий вид установки инструментального индентирования УИМ-01: 1 – силовой привод; 2 – шаговый двигатель; 3 – редуктор шагового двигателя; 4 – драйвер шагового двигателя силового привода; 5 – каретка; 6 – узел крепления индентора; 7 – индентор; 8 – направляющие; 9 – шариковинтовая передача; 10 – пружина; 11 – установочный винт; 12 – тензометрический датчик нагрузки; 13 – фотоэлектрический датчик перемещения; 14 – станина; 15 – основание; 16 – образец; 17 – концевые выключатели верхнего и нижнего положения каретки; 18 – электронный блок обработки сигналов и управления; 19 – АЦП датчика нагрузки

Инструментальное индентирование является перспективным направлением для неразрушающей диагностики состояния материалов. Разработанный комплекс обеспечивает точное определение широкого набора механических характеристик. Перспективы развития связаны с расширением функциональности: внедрением модулей для динамического и циклического нагружения, а также интеграцией с другими методами неразрушающего контроля (акустическая эмиссия) для комплексной оценки остаточного ресурса конструкций. Комплекс может быть эффективно использован для решения задач промышленной диагностики и научно-исследовательских работ.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

1. Крень, А. П. Оценка погрешности определения физико-механических характеристик материалов при их контроле методом индентирования / А. П. Крень // Приборы и методы измерений. – 2018. – Т. 9, № 3. – С. 263–271.
2. Крень, А. П. Применение метода дифракции рентгеновских лучей для изучения напряженного состояния поверхности металла при статическом и ударном деформировании / А. П. Крень // Приборы и методы измерений. – 2023. – Т. 14, № 2. – С. 27–37.