

УДК 621.643.053

НОВЫЕ ВОЗМОЖНОСТИ МЕТОДА ДИНАМИЧЕСКОГО ИНДЕНТИРОВАНИЯ В ПРИБОРЕ ИМПУЛЬС-2М

А. В. РАБЦЕВИЧ, О. В. МАЦУЛЕВИЧ

*Государственное научное учреждение «Институт
прикладной физики НАН Беларуси», г. Минск*

Введение

В последнее время во многих отраслях промышленности широкое распространение получили твердомеры динамического действия, работа которых основана на ударном методе приложения нагрузки и определении твердости по параметрам внедрения индентора в материал. Портативные динамические приборы, по сравнению со статическими твердомерами Бринелля, Роквелла и Виккерса, обладают бесспорными преимуществами, заключающимися, прежде всего, в возможности контроля находящихся в эксплуатации объектов без изготовления специальных образцов и разрушения изделия. Кроме того, они позволяют контролировать большие объекты с произвольно ориентированными в пространстве поверхностями.

Однако на применение традиционных динамических твердомеров накладывается ряд ограничений, обусловленных тем, что они измеряют только коэффициент восстановления скорости и рассчитывают результат по калибровочным зависимостям между этим параметром и твердостью. Подобный метод измерения не требует сложных технических или программных средств, но скорость отскока в значительной мере подвержена влиянию таких мешающих факторов как недостаточная масса или локальная жесткость испытываемого изделия, а также шероховатость его поверхности. Так, при увеличении шероховатости от Ra1,6–2,5 (рекомендуемые значения) до Ra4–5 погрешность может составлять 30–40 НВ, а при контроле изделий толщиной до 4 мм погрешность может достигать 60 НВ даже при относительно небольшой номинальной твердости (100–200 НВ). Минимальная допустимая толщина контролируемого изделия определяется энергией удара и составляет 10–12 мм, при требованиях к массе объекта не менее 2,5 кг.

Следует также отметить, что в существующих динамических твердомерах не автоматизирована корректировка показаний при контроле произвольно ориентированных в пространстве поверхностей, т. е. перед каждым изменением направления удара пользователь должен производить дополнительную настройку прибора, учитывающую угол между направлением удара и направлением действия силы тяжести.

Кроме того, существенным недостатком всех известных на настоящее время твердомеров является сложность их использования в полевых условиях для оценки состояния действующих конструкций и оборудования. Помимо указанных выше ограничений, это связано с отсутствием возможности вводить текстовую информацию, например, с целью привязки результатов измерений к конкретному участку исследуемого объекта или для внесения кратких выводов и комментариев в протокол испытаний.

Основные принципы получения и обработки первичной информации

Как показали наши исследования, возможности динамических твердомеров могут быть значительно расширены за счет применения не используемого ранее в портативных приборах принципа получения первичной информации о контролируемом объекте [1] и наличия в приборе встроенного карманного персонального компьютера (КПК) для обработки полученных при измерении данных. Данный подход позволил разработать и реализовать методики учета влияния мешающих факторов и последующей отстройки от них.

Традиционные твердомеры динамического действия используют в качестве первичной информации значения сигналов, пропорциональных предупредной скорости и скорости отскока (например, $E_{\text{отп}}$ [2]) или только скорости отскока (ТПЦ [3]). В отличие от них, разработанный в Институте прикладной физики НАН Беларуси прибор Импульс-2М позволяет регистрировать весь процесс изменения текущей скорости при ударе с помощью магнитоиндукционного датчика и АЦП с частотой дискретизации 5 МГц. В процессе удара постоянный магнит, вмонтированный в индентор, взаимодействует с катушкой индуктивности, закрепленной на корпусе ударного преобразователя. Параметры катушки выбираются таким образом, чтобы при ударе в ней наводился сигнал, строго пропорциональный текущей скорости индентора, т. к. коэффициент перевода наводимой ЭДС в скорость зависит от параметров постоянного магнита и катушки индуктивности, то для подтверждения соответствия заданной предупредной скорости для различных пар магнит-катушка используется абсолютное значение скорости, а не ЭДС.

На рис. 1 представлена типичная кривая сигнала, пропорционального изменению скорости индентора в процессе удара. Начиная с момента касания ($t = t_0$), скорость индентора сначала убывает от максимального значения V_{max} до нуля (активный этап удара), затем меняет знак и достигает значения V_{min} , соответствующего скорости отскока (пассивный этап удара), после чего происходит отделение индентора от испытуемого объекта. Измеряемая твердость H является функцией коэффициента восстановления скорости e , равного отношению скорости отскока V_{min} к скорости падения V_{max} :

$$H = f\{e\} = f\left\{\frac{V_{\text{min}}}{V_{\text{max}}}\right\}. \quad (1)$$

Как видно из рис. 1, сигнал, регистрируемый магнитоиндукционным датчиком, содержит высокочастотный шум, поэтому для корректного анализа первичной информации необходимо осуществлять восстановление неискаженного сигнала. Использование в приборе КПК дает возможность применять специальные алгоритмы обработки массива текущей скорости, позволяющие в максимальной степени приблизить оцифрованный в присутствии шумов сигнал к его исходному аналоговому виду. На рис. 1 в качестве примера восстановления сигнала приведен увеличенный фрагмент А кривой зависимости скорости движения индентора от времени, соответствующий началу удара.

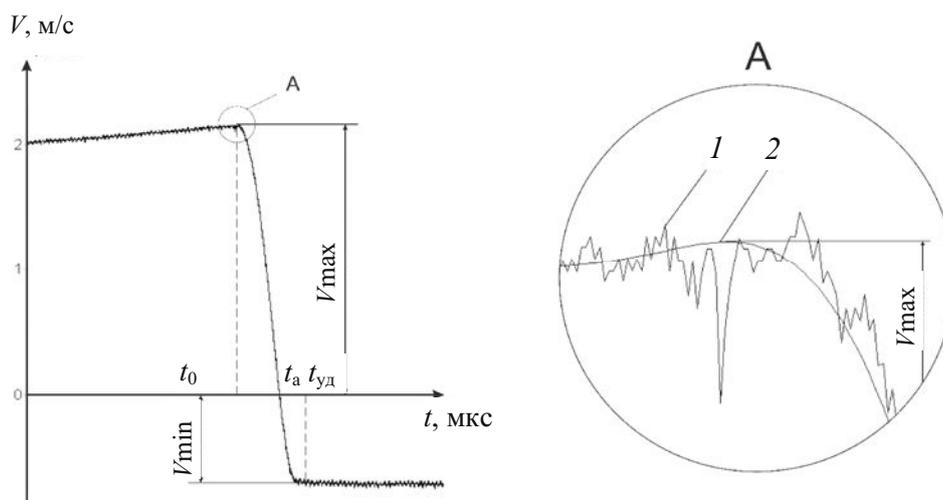


Рис. 1. Типичная зависимость скорости индентора от времени: 1 – оцифрованный в присутствии шумов сигнал; 2 – исходный аналоговый сигнал; t_0 – момент начала удара; $t_{уд}$ – длительность удара; t_a – длительность активного этапа удара

Восстановление исходного сигнала необходимо как для точного нахождения параметров, определяемых непосредственно по кривой 2 (предударная скорость V_{max} , скорость отскока V_{min} и длительность активного этапа удара t_a), так и для корректной последующей обработки сигнала. Последующая обработка (дифференцирование и интегрирование) позволяет построить основную кривую вдавливания (зависимость нагрузки от глубины внедрения) и получить такие параметры ударного процесса, как максимальное контактное усилие и максимальная глубина внедрения индентора в материал. Используя их можно по принятой модели упругопластического деформирования металла [1] рассчитать динамическую твердость (по Мейеру или по Бринеллю) и дифференциальную пластическую твердость. При этом следует отметить, что дифференцирование дискретного по уровню сигнала является некорректной задачей и невозможно без его предварительного приведения к гладкому виду. Так, при нахождении производной методом конечных разностей при приращении сигнала на 1 дискрету ошибка дифференцирования может достигать 100 % и более. Наличие шумов существенно увеличивает погрешность.

Перечисленные параметры упругопластического вдавливания могут использоваться для расчета твердости и других механических характеристик контролируемого изделия, а также в методиках отстройки от влияния мешающих факторов.

Отстройка от вариации предударной скорости индентора

Помимо вычисления коэффициента восстановления скорости, значения V_{min} и V_{max} используются для отстройки от вариации предударной скорости, возникающей из-за различной ориентации ударного преобразователя в пространстве и трения индентора при перемещении внутри направляющих ударного преобразователя. В качестве базового значения предударной скорости принимается максимально возможная скорость V'_{max} , соответствующая удару вертикально вниз. При измерениях в других направлениях ее величина всегда будет отличаться в меньшую сторону – максимальное отклонение имеет место при контроле потолочных поверхностей (удар вертикально вверх) и может достигать 10–15 %. Уменьшение предударной скорости приводит к уменьшению скорости отскока, но значение твердости, рассчитанное по коэффициенту восстановления, при этом увеличивается.

В разработанном алгоритме отстройки от непостоянства предупредной скорости используется разность между максимально возможной предупредной скоростью V'_{\max} и ее действительным значением V_{\max} . По каждому значению полученной разности с использованием калибровочной зависимости вычисляется соответствующее изменение коэффициента восстановления скорости Δe во всем диапазоне твердости H :

$$\Delta e = f[(V'_{\max} - V_{\max}), H]. \quad (2)$$

С учетом найденной поправки Δe скорректированное значение твердости определяется по формуле (1). Как показали эксперименты, отстройка от непостоянства предупредной скорости делает результаты измерения твердости полностью независимыми от направления удара. При этом корректировка показаний выполняется в автоматическом режиме без каких-либо дополнительных действий пользователя.

Отстройка от влияния шероховатости контролируемой поверхности

При контроле металлических изделий динамическими твердомерами наиболее распространенным мешающим фактором, снижающим точность измерения, является шероховатость контролируемой поверхности. Причиной возникновения шероховатости может быть недостаточное качество обработки поверхности готового изделия, износ изделия либо зачистка его абразивным инструментом для контроля в полевых условиях. При этом увеличение шероховатости приводит как к разбросу показаний (увеличению случайной погрешности), так и к занижению измеренных значений твердости (появлению систематической погрешности). Систематическая погрешность измерений вызвана потерей части энергии удара на пластическое деформирование неровностей поверхности. Для уменьшения влияния шероховатости на результат измерения можно повысить энергию удара путем увеличения предупредной скорости индентора или его массы. Однако это существенно увеличивает требования, предъявляемые к минимальной локальной жесткости и массе контролируемого изделия. Так, динамический твердомер E_{tip} с датчиком типа G (энергия удара увеличена в 9 раз по сравнению с базовой модификацией) позволяет проводить измерения на поверхностях с шероховатостью Ra до 7 мкм. При этом локальная масса изделия должна составлять не менее 15 кг. Подобные ограничения значительно сужают область применения прибора.

Значительно уменьшить влияние качества контролируемой поверхности без существенного увеличения энергии удара можно, измеряя несколько параметров ударного процесса, имеющих различную чувствительность к шероховатости. Нами были проведены теоретические и экспериментальные исследования по изучению влияния шероховатости на все основные параметры упругопластического вдавливания. По результатам исследований предложено определять твердость как функцию двух переменных: длительности активного этапа удара и динамической твердости по Мейеру. Вид этой функции определялся эмпирически путем измерения твердости специально подготовленных образцов различной шероховатости.

Приведенная методика позволяет расширить диапазон применимости прибора на изделия с шероховатостью поверхности до $Ra = 4 \dots 5$ мкм с погрешностью, не превышающей допустимую по паспорту прибора (± 15 НВ). Данная коррекция выполняется для средних значений (математического ожидания) группы измерений, т. к. индивидуальные измерения в силу случайного характера влияния шероховатости поверхности не могут быть уточнены с достаточной достоверностью.

Отстройка от влияния недостаточной жесткости или массы контролируемого изделия

Другим недостатком, присущим твердомерам динамического действия, является ограничения массы и толщины изделия в области контроля. При контроле изделия с недостаточной массой происходит необратимое смещение объекта контроля в процессе удара, на что расходуется часть кинетической энергии индентора. Это приводит к занижению показаний твердомера. При контроле изделия с недостаточной жесткостью в области измерения удар индентора вызывает локальный упругий прогиб изделия. Это изменяет соотношение между упругой и пластической деформацией в процессе удара и также приводит к возникновению систематической погрешности измерения. Снижение энергии удара как способ решения проблемы является малоэффективным. Оно существенно повышает требования к качеству обработки поверхности контролируемого изделия и увеличивает случайную погрешность измерения, как вследствие влияния шероховатости, так и из-за неоднородности свойств металла по объему. Таким образом, если объект контроля обладает недостаточной локальной массой или жесткостью и его невозможно притереть обратной стороной к массивному основанию посредством консистентной смазки, то его невозможно контролировать существующими динамическими твердомерами с достаточной точностью.

Проведенные нами исследования показали, что степень влияния податливости объекта контроля изменяется в процессе удара. Активный этап удара является менее чувствительным к этому фактору, чем пассивный этап. Физически это объясняется двумя причинами: ограниченным временем распространения упругих волн в металле, соизмеримым со временем удара, и разным соотношением между пластической и упругой составляющей деформации на активном и пассивном этапе удара. Экспериментально данное утверждение подтверждается ходом регистрируемой кривой внедрения индентора в металл и проявляется в меньшей чувствительности к податливости изделия параметров активного этапа удара – времени, максимальной контактной силы, динамической твердости Мейера по сравнению с коэффициентом восстановления скорости.

Проведенные эксперименты на образцах с различной локальной жесткостью и массой показали, что наименее чувствительной к этим факторам из регистрируемых параметров удара является динамическая твердость Мейера. Динамическая твердость рассчитывалась по принятой модели взаимодействия индентора с металлом как среднее контактное давление в отпечатке, достигаемое в конце активного этапа удара. Для минимизации влияния шероховатости поверхности и податливости изделия предварительно производилась дополнительная математическая обработка кривой внедрения индентора в металл. По значениям динамической твердости Мейера была произведена калибровка твердости в стандартных единицах Бринелля – НВ.

Нами были проведены измерения на стальных образцах с изменяемой жесткостью. Анализ значений твердости по Бринеллю, рассчитанных по динамической контактной твердости, показал возможность использования этого параметра при измерениях твердости изделий с пониженной жесткостью или массой. Например, при контроле стальных труб с толщиной стенки свыше 5,5 мм погрешность измерения не превышает допустимую.

Описание прибора и сервисных функций

Общий вид и структурная схема прибора Импульс-2М приведены на рис. 2, а и б. Преобразование полученного и усиленного аналогового сигнала в цифровой код производится в аналого-цифровом преобразователе, после чего он передается в КПК,

в котором производится обработка сигнала. АЦП и КПК объединены в одном корпусе (блок обработки на рис. 2, а).

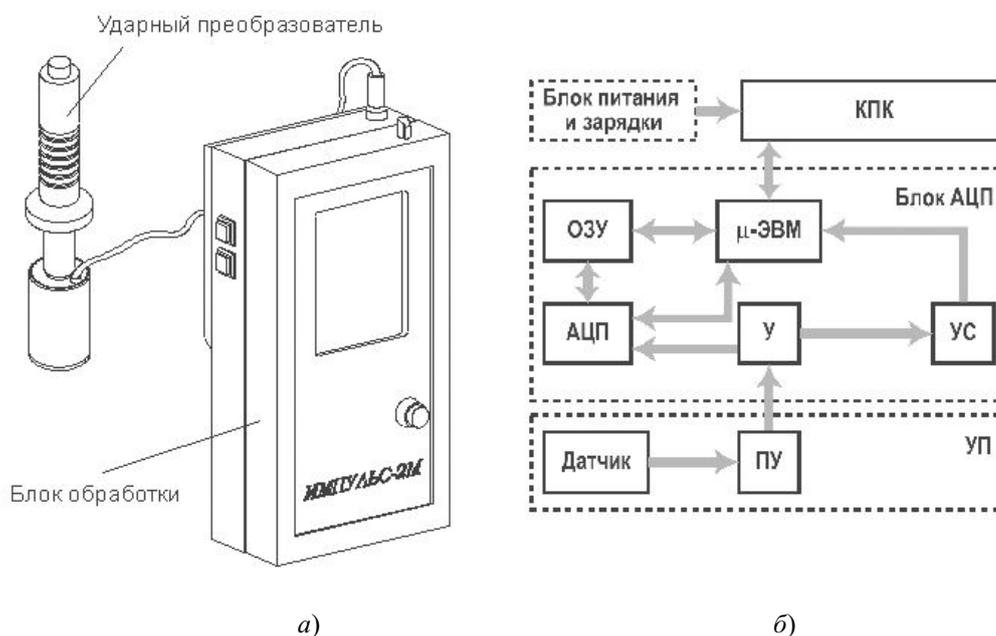


Рис. 2. Прибор Импульс-2М: а – общий вид; б – структурная схема; КПК – карманный персональный компьютер; ОЗУ – оперативное запоминающее устройство; μ-ЭВМ – микроЭВМ; АЦП – аналого-цифровой преобразователь; У – усилитель; УС – устройство синхронизации; ПУ – предварительный усилитель; УП – ударный преобразователь

Использование КПК, помимо выполнения всех необходимых расчетов, позволяет существенно повысить уровень сервиса, предоставляемого прибором пользователю. С его помощью можно осуществлять следующие операции:

- Создавать, редактировать или удалять группы измерений (множества измерений, характеризующих свойство металла изделия в контролируемом участке) с их последующей статистической обработкой прибором (определение среднего значения и среднего квадратичного отклонения).
- Вводить текстовую информацию на русском или английском языке. При этом группа измерений получает легко идентифицируемый вид. Эта возможность особенно ценна в связи с тем, что прибор позволяет запоминать до 400 результатов измерений. При установке дополнительной карты памяти емкостью 256 Мб количество запоминаемых измерений увеличивается до 10000.
- Отображать рассчитанные значения механических характеристик материалов (с возможностью помещения краткого комментария к каждому измерению) как индивидуально по каждому измерению, так и в виде статистики группы.
- Определять предел прочности контролируемого материала по индивидуальной зависимости для каждой из марок стали, записанных в памяти КПК.

Прибор определяет предел прочности при растяжении по ГОСТ 22761 и по индивидуальным зависимостям для ряда сталей. Указанный ГОСТ основан на использовании устойчивой корреляционной зависимости, связывающей твердость по Бринеллю с пределом прочности, и предназначен для сталей перлитного класса, охватывающих достаточно широкий диапазон конструкционных сталей специального назначения, отличающихся содержанием углерода и легирующих элементов. Для ряда сталей (17Г1С, Ст20, Ст45, Ст3кп, 09Г2С, Х70) были проведены дополнительные экспериментальные исследования по установлению более точных эмпирических со-

отношений между значениями твердости по Бринеллю и пределом прочности. Полученные соотношения, в отличие от ГОСТа, позволяют использовать более точные, не усредненные по классу зависимости. Перед проведением измерений пользователь выбирает марку контролируемой стали из списка прибора (однократно для группы измерений) и прибор осуществляет автоматическое определение предела прочности по зависимости для выбранного металла. В то же время, следует отметить, что универсальная зависимость для сталей перлитного класса обеспечивает достаточно высокую точность определения предела прочности и может использоваться как оценочная для стали неизвестной марки либо в случае если данная марка стали отсутствует в программном обеспечении прибора.

Прибор имеет возможность подключения к персональному компьютеру (через USB-порт) для хранения практически неограниченных объемов информации о свойствах контролируемых объектов, проведения мониторинга их состояния, более подробного анализа данных, полученных после обработки массива первичной информации. Результаты измерений импортируются специально разработанной программой и хранятся во встроенной базе данных в удобном структурированном виде. При этом вся текстовая информация, введенная пользователем в приборе в процессе измерений, при осуществлении импорта автоматически заносится в базу данных вместе с самими измерениями, позволяя их идентифицировать.

Прибор прошел государственные испытания в 2005 г., занесен в Государственный реестр средств измерений (сертификат № 3380) и допущен к обращению в Республике Беларусь. В таблице приведены основные метрологические характеристики прибора Импульс-2М:

Метрологические характеристики прибора Импульс-2М

Измеряемая величина	Единицы измерения	Пределы измерения	Погрешность
Твердость по Бринеллю	НВ	от 90 до 450	±10 при твердости (100 ± 25) НВ ±15 при твердости (200 ± 50) НВ ±15 при твердости (400 ± 50) НВ
Твердость по Роквеллу	HRC	от 20 до 67	±2 при твердости (25 ± 5) HRC ±1,5 при твердости (45 ± 5) HRC ±1,5 при твердости (65 ± 5) HRC
Предел прочности	МПа	от 380 до 1520	±35 при твердости (100 ± 25) НВ ±55 при твердости (200 ± 50) НВ ±80 при твердости (400 ± 50) НВ

Заключение

Разработан портативный прибор Импульс-2М, предназначенный для неразрушающего экспресс-контроля твердости и предела прочности металлических изделий. Прибор прошел Государственные приемочные испытания и занесен в Государственный реестр средств измерений.

Прибор отличается от существующих аналогов наличием встроенного карманного персонального компьютера, позволяющего сопровождать сделанные измерения текстовыми комментариями, осуществлять статистическую обработку результатов, передавать результаты измерений в персональный компьютер для длительного хранения и мониторинга состояния эксплуатируемых объектов.

Применение в приборе компьютерной обработки первичной информации, в качестве которой выступает весь процесс внедрения индентора в материал при ударе,

позволило разработать и реализовать методики отстройки от шероховатости поверхности и недостаточной локальной жесткости объектов измерения. Результатом применения данных методик стала возможность контроля произвольно ориентированных в пространстве поверхностей с шероховатостью Ra до 5 мкм при минимальной толщине стенки контролируемого изделия 5–6 мм.

Литература

1. Рудницкий, В. А. Метод динамического индентирования для оценки механических характеристик металлических материалов / В. А. Рудницкий, А. В. Рабцевич // Дефектоскопия. – 1997. – № 4. – С. 79–86.
2. Лееб, Д. К определению характеристик твердости материала «L» по динамическому методу измерений «Eqoutip» / Д. Лееб. – V. 1. – № 583. – *Vorichte*, 1986.
3. Прибор для определения твердости материалов: а. с. № 1138696 СССР, / В. А. Рудницкий, А. А. Лухвич, И. И. Недбальский // Бюллетень изобретений. – 1985. – № 5. – С. 139.

Получено 19.10.2006 г.

УДК 621.937

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ ОЦЕНКА ВЛИЯНИЯ ЖИДКОСТНОЙ ПРОСЛОЙКИ НА ВЕЛИЧИНУ СИЛ, ДЕЙСТВУЮЩИХ ПРИ ВНЕДРЕНИИ ЖЕСТКОГО ИНДЕНТОРА В ПЛАСТИЧНОЕ ОСНОВАНИЕ И ЕГО ПОСЛЕДУЮЩЕМ ИЗВЛЕЧЕНИИ

**М. Г. КИСЕЛЕВ, А. А. НОВИКОВ,
А. Н. КАПОРИН, Д. А. СТЕПАНЕНКО**

Белорусский национальный технический университет, г. Минск

Введение

Целью данных исследований явилось изучение закономерностей внедрения жесткого индентора в пластичный материал при наличии жидкой среды и без неё и оценка степени закрепления индентора при различных направлениях его последующего извлечения. Установление и количественная оценка таких закономерностей представляют значительный интерес для ряда практических приложений, в частности, для повышения качества шаржирования поверхностей абразивными (алмазными) зёрнами за счет определения условий выполнения этой операции, обеспечивающих высокую степень закрепления зёрен в материале подложки. В свою очередь, это позволит повысить режущую способность и стойкость инструментов, имеющих на рабочих поверхностях алмазоносный слой, сформированный методом шаржирования.

Методика проведения исследований

При моделировании процесса пластической деформации материалов, в частности, обработки металлов давлением, широко используется масштабное физическое моделирование. При этом в качестве модельного материала применяют как пластичные металлы (например, алюминиевые сплавы), так и различные неметаллические материалы (например, воск и пластилин) [1], [2]. В данной работе в качестве модельного материала использовался пластилин. В качестве модели абразивной частицы был взят сферический индентор диаметром 7 мм, изготовленный из яшмы с полированной поверхностью. Индентор внедрялся в пластичное основание из модельного материала. Для последующего извлечения индентора использовалась тонкая стальная проволока, которая с помощью эпоксидной смолы закреплялась в предварительно просверленном в нем глухом отверстии диаметром 1 мм и глубиной 5 мм.

Эксперименты по внедрению и извлечению индентора проводились на специально созданной экспериментальной установке (рис. 1), оснащенной соответствующими средствами измерений, позволяющими определять зависимость усилия внедрения (извлечения) индентора от глубины его погружения в материал подложки.

Компоновка узлов экспериментальной установки позволяла производить извлечение индентора в двух направлениях: нормально и тангенциально к поверхности пластилинового основания. На рис. 2 представлена схема установки, соответствующая извлечению индентора в нормальном направлении.