

МАШИНОСТРОЕНИЕ, МЕХАНИКА
MECHANICAL ENGINEERING AND MECHANICS

УДК 620.178

Поступила в редакцию 09.06.2017
Received 09.06.2017

А. П. Крень, В. А. Рудницкий, Н. В. Зинькевич

Институт прикладной физики Национальной академии наук Беларуси, Минск, Беларусь

**МОДЕЛИРОВАНИЕ УДАРНОГО КОНТАКТА ИНДЕНТОРА С НЕЖЕСТКИМИ
СТАЛЬНЫМИ КОНСТРУКЦИЯМИ ПРИ ИЗМЕРЕНИИ ТВЕРДОСТИ**

Аннотация. Рассматриваются вопросы измерения твердости конструкций недостаточной жесткости методом ударного вдавливания индентора. Описываются недостатки существующих динамических твердомеров, принцип действия которых заключается в нанесении удара по испытуемому образцу и регистрации коэффициента восстановления скорости, зависящего от твердости. Построены конечно-элементные модели ударного взаимодействия индентора с образцами труб с различной толщиной стенки и диаметром, а также консольно закрепленных пластин разной толщины. Получены диаграммы вдавливания индентора в исследуемые образцы труб и пластин в координатах контактное усилие – перемещение. Показана достаточно хорошая сходимость между результатами моделирования и экспериментальными данными, полученными на твердомере, позволяющем регистрировать кривую нагружения в процессе ударного взаимодействия. С помощью построенных конечно-элементных моделей выделен вклад локальной деформации и прогиба в общий отклик конструкции при индентировании. Установлено влияние прогиба конструкций на процесс внедрения индентора в материал, а также на такие параметры индентирования, как коэффициент восстановления скорости, контактное усилие, перемещение и время активного этапа удара. Определены границы допустимого использования твердомеров ударного действия. Показаны пути повышения точности измерения твердости на основе данных, получаемых на этапе внедрения индентора. Установлено, что использование градуировочных зависимостей между твердостью и временем активного этапа удара, а также отношением контактного усилия к глубине внедрения на этапе нагружения позволяет провести оценку твердости для труб с толщиной стенки свыше 5 мм и консольно закрепленных пластин на расстоянии от места закрепления вплоть до 100 мм.

Ключевые слова: твердость, конечно-элементное моделирование, индентирование, нежесткие конструкции

Для цитирования. Крень, А. П. Моделирование ударного контакта индентора с нежесткими стальными конструкциями при измерении твердости / А. П. Крень, В. А. Рудницкий, Н. В. Зинькевич // Вес. Нац. акад. наук Беларуси. Сер. физ.-техн. наук. – 2017. – № 4. – С. 38–45.

A. P. Kren, V. A. Rudnitsky, N. V. Zinkevich

Institute of Applied Physics of the National Academy of Sciences of Belarus, Minsk, Belarus

**MODELING OF IMPACT CONTACT OF INDENTER AND NON-RIGID STEEL CONSTRUCTIONS DURING
MEASUREMENT OF HARDNESS**

Abstract. The problems of measuring hardness of constructions with insufficient rigidity by the dynamic indentation are discussed. The disadvantages of the existing dynamic hardness testers are described, the operation of which consists in impact indentation and determination of the hardness, depending on the restitution coefficient. Finite-element models of the contact of the indenter and the pipes samples with various wall thicknesses and diameters and cantilevered plates of various thicknesses are developed. Indentation diagrams for the investigated samples of pipes and plates in the coordinate plane of force-displacement are obtained. The results of the simulation have good convergence with the experimental data. With the help of the finite element models the separation of local penetration and deflection of construction is made. It is shown the influence of steel construction deflection on the process of indenter impression into the material tested and the change of indentation parameters as restitution coefficient, contact force, penetration depth and time of the active part of the impact. The limits of possible application of dynamic hardness testers have been determined. The ways of the increasing of the hardness measurement accuracy on the base of the data obtained during impact interaction are shown. It is established that the

use of dependences between hardness and the time of the active stage of impact, as well as the ratio of the contact force to the depth of penetration at the loading stage, makes it possible to evaluate the hardness for pipes with the wall thickness exceeding 5 mm and cantilevered plates at the distance from the fixed support up to 100 mm.

Keywords: hardness, finite-element modeling, indentation, non-rigid constructions

For citation. Kren A. P., Rudnitsky V. A., Zinkevich N. V. Modeling of impact contact of indenter and non-rigid steel constructions during measurement of hardness. *Vesti Natsyyanal'nai akademii nauk Belarusi. Seriya fizika-technichnykh nauk = Proceedings of the National Academy of Sciences of Belarus. Physical-technical series*, 2017, no. 4, pp. 38–45 (in Russian).

Введение. Точное измерение твердости имеет важное практическое значение при техническом диагностировании потенциально опасного промышленного оборудования (трубопроводов, сосудов высокого давления, металлоконструкций). Прежде всего это связано с тем, что данная характеристика имеет устойчивую корреляционную связь с прочностью [1] и пределом текучести [2], которые во многом определяют возможность дальнейшей эксплуатации оборудования. При этом одним из главных преимуществ измерения твердости является оперативность ее определения и неразрушающий характер контроля.

В настоящее время наиболее применяемыми на практике являются динамические твердомеры, принцип действия которых заключается в нанесении удара по испытываемой поверхности индентором с заданной кинетической энергией и регистрации коэффициента восстановления скорости K_r , равного отношению скорости отлета индентора V_0 к его предударной скорости V_n . Физически при таком методе измерения значение твердости определяется по величине энергии, затраченной на пластическую деформацию в месте контакта наконечника индентора с испытываемым материалом. Главным недостатком этих приборов является обязательное требование к достаточной массивности и жесткости контролируемого изделия. Как правило, сосредоточенная масса под индентором должна составлять не менее 2,5 кг, а изделие не должно при этом вибрировать. Если при испытательном ударе – динамическом индентировании – возникает прогиб контролируемого участка изделия (что часто происходит при контроле тонкостенных труб или консольно закрепленных элементов), то возникает значительная погрешность измерений, поскольку эта деформация принимается за локальную пластическую деформацию.

Оценить влияние прогиба конструкции при обычных измерениях довольно сложно, а учесть его эмпирическими коэффициентами для широкой номенклатуры изделий также затруднительно. В данном случае более эффективным методом, позволяющим провести анализ локальных деформаций и отделить их от прогиба, является конечно-элементное моделирование, которое дает возможность оценить напряженно-деформированное состояние в месте контакта для изделий с различными массогабаритными параметрами. При получении достаточного объема аналитических данных такое моделирование позволяет достичь цели настоящей работы – определить границы допустимого использования твердомеров ударного действия, а также обосновать меры по повышению точности измерений.

Постановка задачи и метод исследования. Основными вариантами конструкций для анализа поведения их при динамическом индентировании являлись трубы различного диаметра, а также консольно закрепленные стальные пластины разной толщины. Индентирование пластин проводилось на различном расстоянии L от места закрепления. Схема основных перемещений индентора и пластины показана на рис 1. Изучение выпускаемого в настоящее время сортамента горяче-, холоднодеформированных и электросварных труб согласно ГОСТ 10 704-91 «Трубы стальные электросварные прямошовные» позволило отобрать для моделирования наиболее характерные варианты: внешний диаметр D – 70 мм, 152 и 402 мм, толщина стенки h – от 3,0 мм до 12 мм. Геометрические параметры пластин были выбраны исходя из опыта работ на промышленных объектах: толщина h – выше 5 мм, ширина b – более 20 мм. Диапазон изменения твердости сталей, применяемых

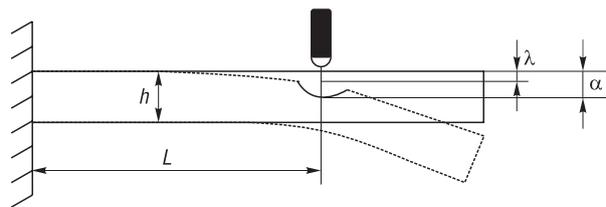


Рис. 1. Схема основных перемещений индентора и пластины

Fig. 1. Scheme of a typical displacements of the indenter and the plate

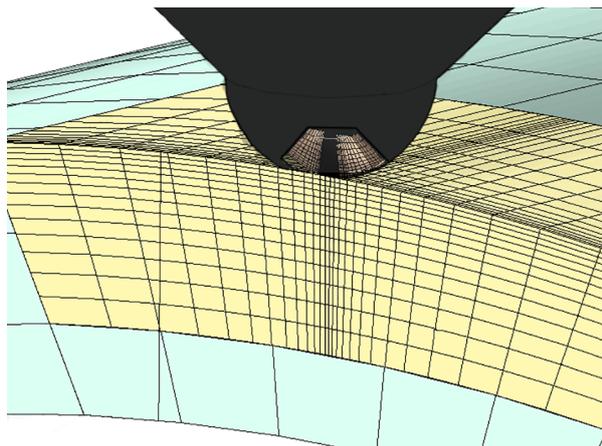


Рис. 2. Геометрическая модель контакта индентора с участком трубы

Fig. 2. Geometric model of indenter contact with the part of the pipe

Сетка конечных элементов для индентора строилась только в пределах заранее подготовленного конуса, непосредственно примыкающего к зоне контакта. При этом сетка конуса также имела сгущение к точке контакта. Остальная часть индентора моделировалась абсолютно жестким телом. Модель материала индентора (карбид вольфрама) принималась линейно-упругой. Поведение материала конструкции – стали – под действием ударной нагрузки описывалось с помощью вязкопластической модели. В качестве закона упрочнения использовалось изотропное упрочнение, основанное на мультилинейной диаграмме деформирования [4], а вязкопластические свойства материала описывались моделью Perzyna [5], которая предполагает, что скорость пластической деформации $\dot{\epsilon}_{pl}$ является функцией текущих значений напряжения в контакте σ , параметра упрочнения n , параметра вязкости материала γ и статического предела текучести σ_0 :

$$\dot{\epsilon}_{pl} = \gamma \left(\frac{\sigma}{\sigma_0} - 1 \right)^{1/n}.$$

Контакт между индентором и поверхностью выбирался нелинейный с трением и симметричным поведением. На индентор накладывалась связь, сохраняющая только вертикальную степень свободы. Плотность материала индентора выбиралась практически равной нулю, поэтому его масса m задавалась с помощью точечной массы и являлась параметром модели. Предударная скорость индентора V_{II} и его радиус R также являлись параметрами модели. Задача решалась методами неявной динамики в нестационарной постановке. Минимальный временной шаг составил 0,1 мкс, максимальный – 2 мкс. Для динамических твердомеров различных производителей радиус индентора может изменяться от 0,5 до 2,5 мм, масса – от 2,5 до 6,0 г, предударная скорость – от 0,5 до 2,5 м/с. Поэтому при моделировании данные параметры принимались следующими: $R = 1,15$ мм, $m = 4,23$ г, $V_{II} = 0,87$ м/с.

Результаты исследований и их анализ. Оценка адекватности результатов конечно-элементного моделирования проводилась путем сравнения с экспериментальными данными, полученными на более совершенном, чем обычный динамический твердомер, приборе ИПМ-1К [6]. Прибор позволяет регистрировать кривую нагружения в процессе ударного взаимодействия в координатах «контактное усилие P – перемещение индентора α », а также определять коэффициент восстановления скорости K_v . Благодаря микроэлектронике прибор может быть реализован в портативном варианте. На рис. 3 показаны результаты эксперимента по индентированию жестко закрепленной меры твердости 105 НВ и моделированию данного процесса при следующих параметрах: $\sigma_0 = 200$ МПа, $\gamma = 70$, $n = 0,45$.

Как видно из рис. 3, результаты моделирования ударного контакта достаточно приближены к экспериментальным данным. Это наблюдается как для диаграммы нагружения, так и кривой

для изготовления указанных нежестких конструкций, согласно ГОСТ 8733-74 «Трубы стальные бесшовные холоднодеформированные и теплодеформированные» и опыту работ составляет 110–270 НВ, предел текучести σ_0 – 170–600 МПа.

Моделирование ударного контакта проводилось с помощью программного пакета ANSYS Student [3]. Для оценки деформаций на микроскопическом уровне сетка конечных элементов создавалась достаточно подробной и постепенно сгущалась к точке контакта. При этом размерность сетки позволяла производить расчеты с рациональными затратами вычислительных ресурсов и машинного времени. Модель строилась на гексагональных элементах первого порядка (рис. 2). Минимальный размер конечного элемента составлял 0,2 мкм.

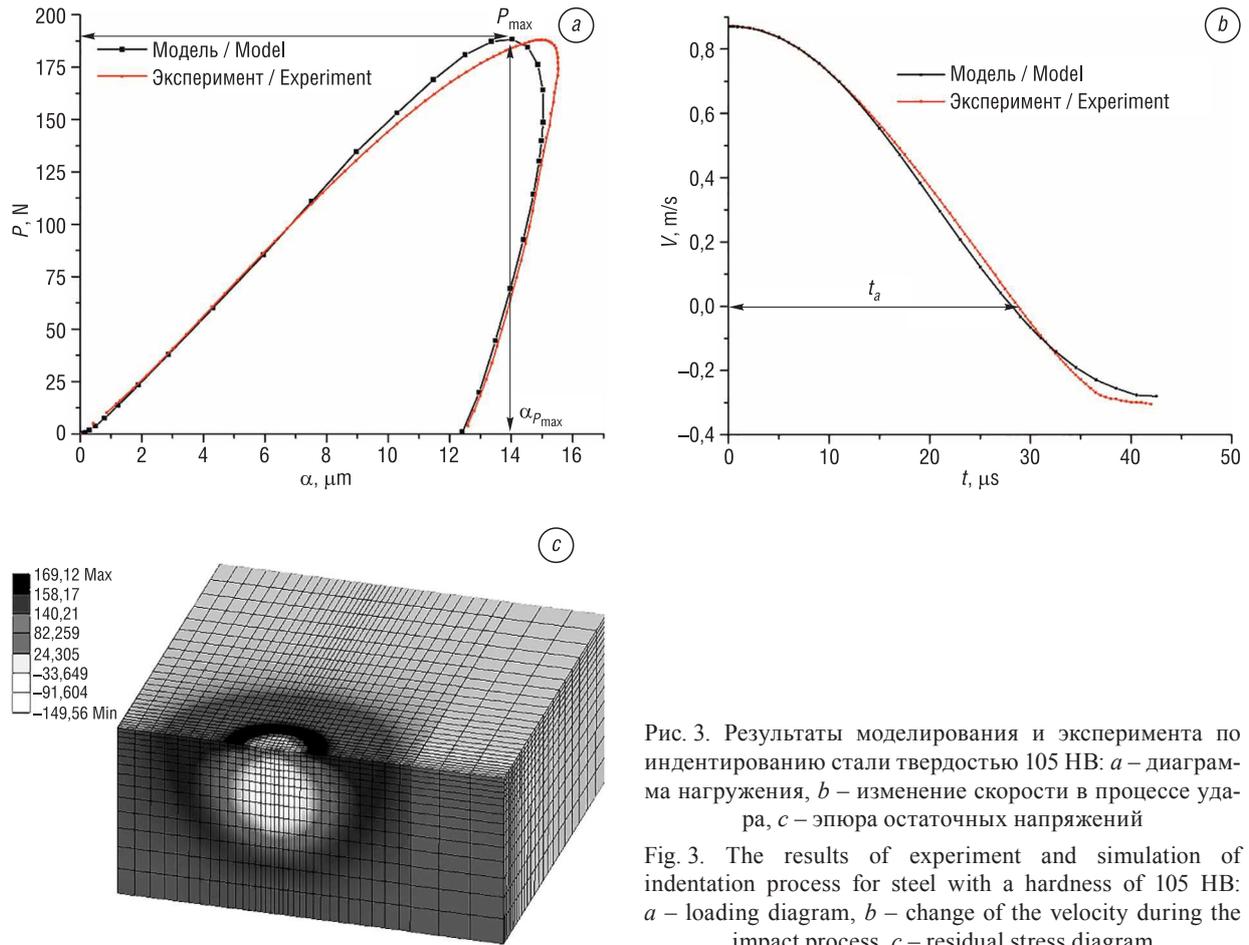


Рис. 3. Результаты моделирования и эксперимента по индентированию стали твердостью 105 HB: a – диаграмма нагружения, b – изменение скорости в процессе удара, c – эпюра остаточных напряжений

Fig. 3. The results of experiment and simulation of indentation process for steel with a hardness of 105 HB: a – loading diagram, b – change of the velocity during the impact process, c – residual stress diagram

изменения скорости в процессе удара. Величина остаточных напряжений в центре отпечатка составляет примерно 0,4 от предела прочности, что также соответствует известным литературным данным [7].

Адекватность получаемых результатов позволяет перейти к моделированию ударного контакта индентора с нежесткими конструкциями в виде труб и консольно закрепленных пластин, целью которого является оценка значимости изменения основных параметров кривой нагружения, используемых при расчете твердости по различным алгоритмам. Такими параметрами, кроме K_r , могут являться: отношение максимальных значений силы и перемещения $P_{\text{max}}/\alpha_{P_{\text{max}}}$ и время активного этапа удара t_a – этапа, на котором индентор внедряется в материал и внедрение достигает максимума [8].

На рис. 4 показано изменение K_r для моделируемых случаев взаимодействия индентора с пластиной и цилиндрической оболочкой (трубой). Коэффициент восстановления скорости не является характеристикой материала и зависит от многих параметров индентирования. В то же время, если воспользоваться известной работой [9], в которой осуществлен переход от твердости в единицах Leeb (а фактически от K_r) к твердости HRC, то можно примерно оценить погрешность измерения твердости по известным шкалам. При таком резком снижении значения K_r , как показывают результаты моделирования (рис. 4), разбежка в показаниях твердости может составить до 50–100 % (40–100 единиц HB). И только при толщине стенки или пластины свыше 12–14 мм погрешностью измерений можно пренебречь, что подтверждает отсутствие необходимости рассматривать при моделировании сортамент труб большого диаметра, которые имеют толщину стенки свыше 12 мм.

В то же время твердость, как уже указывалось, может определяться исходя из значений $P_{\text{max}}/\alpha_{P_{\text{max}}}$ и t_a , которые могут быть прямо использованы для ее расчета [10]. На рис. 5, 6 показаны характерные диаграммы, полученные при индентировании пластин и труб с различными

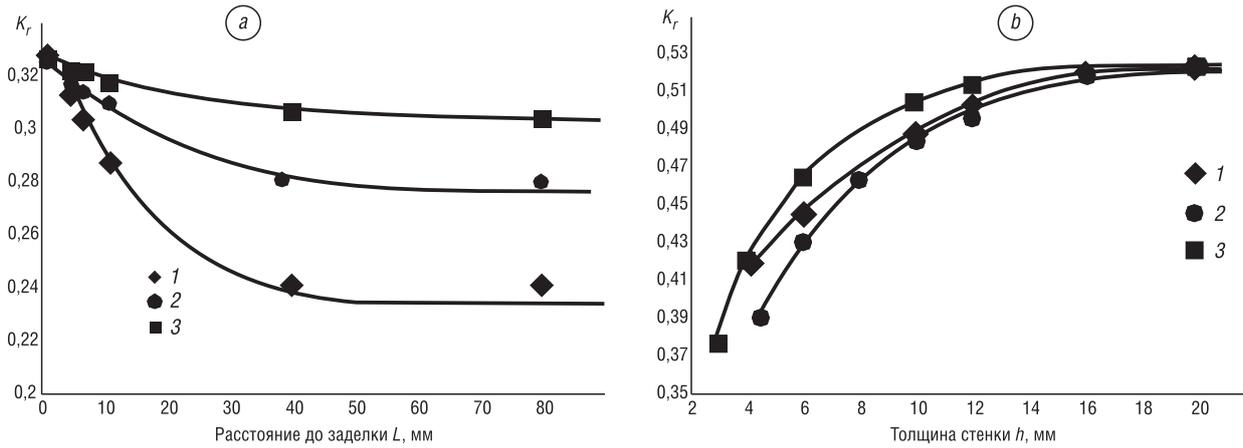


Рис. 4. Изменение коэффициента восстановления скорости в зависимости от: расстояния до места закрепления пластины (твердость 105 НВ) – *a* (толщина пластины: 1 – 5 мм, 2 – 7 мм, 3 – 12 мм); толщины стенки трубы (твердость 210 НВ) – *b* (диаметр трубы: 1 – 105 мм, 2 – 405 мм, 3 – 70 мм)

Fig. 4. Change of the restitution coefficient depending on: the distance to the place of the plate fixing (hardness is equal to 105 НВ) – *a* (the plate thickness is equal to: 1 – 5 mm, 2 – 7 mm, 3 – 12 mm); the thickness of the pipe wall (hardness is equal to 210 НВ) – *b* (the pipe diameter is equal to: 1 – 105 mm, 2 – 405 mm, 3 – 70 mm)

геометрическими параметрами. Следует отметить, что наименее подвержен влиянию прогибов конструкций λ при ударном взаимодействии активный этап нагружения. На пассивном этапе – этапе разгрузки – расхождение кривых нагружения более выражено, что особенно хорошо заметно на примере индентирования труб (рис. 6). При этом, чем выше твердость, тем большую часть в общей деформации занимает прогиб конструкции, что и приводит к увеличению погрешности (рис. 7).

Для проведения комплексного анализа было выполнено 36 вариантов расчетов консольно закрепленных пластин и 18 вариантов расчетов цилиндрических оболочек, имитирующих трубы. Часть этих результатов представлена в таблице.

Как видно из таблицы, отклонение величин $P_{max}/\alpha_{P_{max}}$ и t_a не превышает 3–12 % и 2–3 % соответственно от значений этих же величин для случая массивной, жестко закрепленной пластины. Если принимать во внимание результаты, полученные в [8, 10, 11], то можно утверждать, что такое отклонение приведет к погрешности в измерении твердости до 10–20 единиц НВ при использовании градуировки прибора по параметру $P_{max}/\alpha_{P_{max}}$ и до 15 единиц – при градуировке

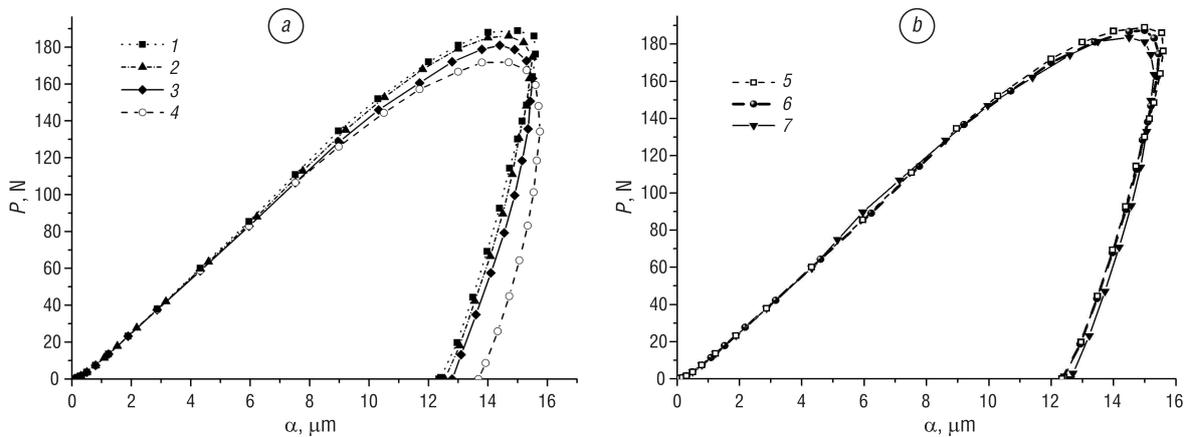


Рис. 5. Типичные диаграммы контактное усилие – перемещение при индентировании пластины твердостью 105 НВ ($\sigma_0 = 200$ МПа), толщиной 5 мм (*a*) и 12 мм (*b*): 1, 5 – внедрение в полупространство материала (жесткая пластина); расстояние от места заделки: 2, 6 – 5 мм, 3 – 10 мм, 4, 7 – 80 мм

Fig. 5. Typical contact force-displacement diagrams during the indentation of the plate with hardness 105 НВ ($\sigma_0 = 200$ МПа), the plate thickness is equal to 5 mm (*a*), 12 mm (*b*): 1, 5 – penetration into the half-space of the material (rigid plate), 2, 6 – distance to the place of fixing is equal to 5 mm, 3 – 10 mm, 4, 7 – 80 mm

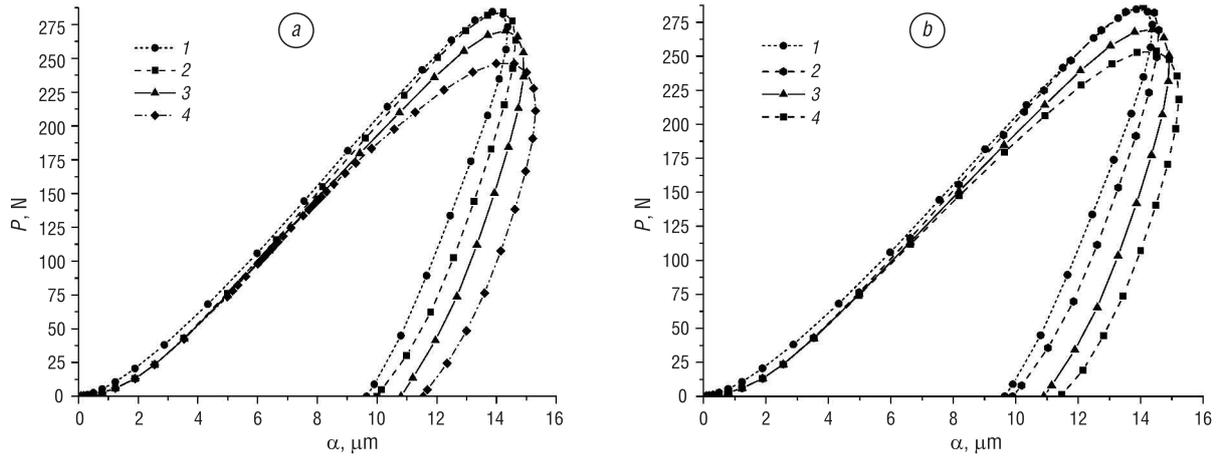


Рис. 6. Типичные диаграммы контактное усилие – перемещение при индентировании трубы твердостью 210 HB ($\sigma_0 = 565$ МПа), диаметром 150 мм (а) и 405 мм (б): 1 – внедрение в полупространство материала (жесткая пластина); толщина стенки трубы: 2 – 10 (12) мм, 3 – 6 мм, 4 – 4 мм

Fig. 6. Typical contact force-displacement curves during the indentation of the pipe with hardness 210 HB ($\sigma_0 = 565$ MPa), pipe diameter is equal to 150 mm (a), 405 mm (b): 1 – impression into the half-space of material (rigid plate); pipe wall thickness is equal to: 2 – 10 (12) mm, 3 – 6 mm, 4 – 4 mm

Изменение параметров ударного контакта для различных конструкций
Variation of the impact contact parameters for different constructions

| Пластина | | HB 105 | | | HB 210 | | |
|----------|-------|------------------------------------|-------------|-------|------------------------------------|-------------|-------|
| L, мм | h, мм | $P_{max}/\alpha_{P_{max}}$, Н/мкм | t_a , мкс | K_r | $P_{max}/\alpha_{P_{max}}$, Н/мкм | t_a , мкс | K_r |
| 0 | 5 | 12,5 | 28 | 0,32 | 19,91 | 23,5 | 0,52 |
| 5 | | 12,2 | 28,3 | 0,315 | 19,49 | 24,4 | 0,517 |
| 10 | | 11,95 | 28,9 | 0,30 | 19,23 | 24,5 | 0,510 |
| 80 | | 11,73 | 29,4 | 0,241 | 18,91 | 24,7 | 0,397 |
| 0 | 12 | 12,55 | 27,9 | 0,322 | 19,83 | 23,4 | 0,523 |
| 5 | | 12,42 | 28,2 | 0,32 | 19,56 | 23,7 | 0,520 |
| 10 | | 12,37 | 28,5 | 0,31 | 19,36 | 24,2 | 0,519 |
| 80 | | 11,95 | 29,3 | 0,304 | 18,95 | 24,5 | 0,499 |
| Труба | | HB 105 | | | HB 210 | | |
| D, мм | h, мм | $P_{max}/\alpha_{P_{max}}$, Н/мкм | t_a , мкс | K_r | $P_{max}/\alpha_{P_{max}}$, Н/мкм | t_a , мкс | K_r |
| 70 | 6 | 11,95 | 28,7 | 0,258 | 18,83 | 24,2 | 0,464 |
| | 4 | 11,46 | 30,1 | 0,231 | 18,43 | 25,3 | 0,42 |
| | 3 | 11,3 | 30,42 | 0,205 | 17,87 | 25,7 | 0,376 |
| 150 | 10 | 12,18 | 28,3 | 0,267 | 19,52 | 24 | 0,485 |
| | 6 | 12 | 29,1 | 0,239 | 18,85 | 24,4 | 0,445 |
| | 4 | 11,49 | 29,5 | 0,212 | 18,57 | 25,5 | 0,42 |
| 405 | 12 | 12,46 | 28 | 0,270 | 19,72 | 23,5 | 0,491 |
| | 8 | 12,05 | 28,4 | 0,248 | 19,06 | 24,2 | 0,463 |
| | 6 | 11,97 | 28,6 | 0,230 | 18,86 | 24,3 | 0,43 |
| | 4,5 | 11,84 | 29,3 | 0,210 | 18,73 | 24,6 | 0,39 |

по параметру t_a при снижении толщины стенки до 5 мм. В то же время, для конструкций с твердостью более 300 HB ее измерение, исходя из величины активного времени удара, становится проблематичным вследствие низкой чувствительности t_a к изменению твердости. Поэтому, при измерении твердости нежестких конструкций можно предложить алгоритм ее определения с разбивкой по диапазонам: до 250 HB применять градуировку прибора, используя значения t_a , свыше этого значения – параметр $P_{max}/\alpha_{P_{max}}$.

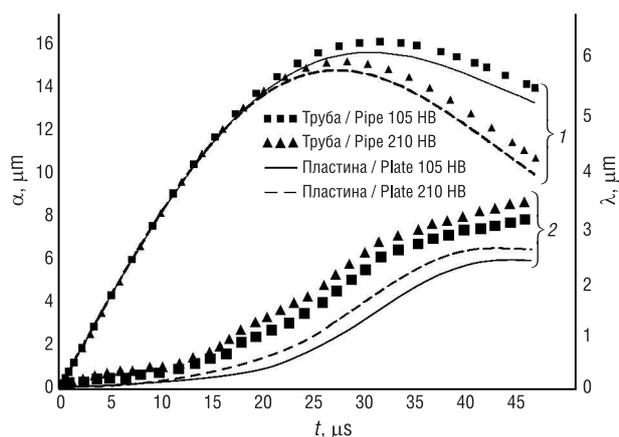


Рис. 7. Перемещение индентора и прогиб конструкции в зависимости от твердости и вида контролируемого изделия: 1 – изменение локального внедрения индентора, 2 – прогиб конструкции в процессе ударного взаимодействия

Fig. 7. Displacement of the indenter and the deflection of the construction, depending on the hardness and the type of the sample tested: 1 – change of the local penetration of the indenter, 2 – deflection of the construction during the impact interaction process

Благодарности

Работа выполнена при поддержке Белорусского республиканского фонда фундаментальных исследований. Грант T16-013 «Разработка физических основ контроля твердости материалов конструкций, имеющих ограниченную жесткость, методом динамического локального деформирования».

Acknowledgments

This paper was supported by the Belarusian Republican Foundation for Fundamental Research. Grant T16-013 “Development of the physical basis of the control of the hardness of materials of constructions with the limited stiffness by the dynamic local straining”.

Список использованных источников

1. Львовский, П.Г. Справочное руководство механика металлургического завода / П.Г. Львовский. – 4-е изд., испр. и доп. – Свердловск: Metallurgizdat, 1962. – 980 с.
2. Марковец, М.П. Определение механических свойств металла по твердости / М.П. Марковец. – М.: Машиностроение, 1979. – 191 с.
3. Free Simulation Software Ansys [Electronic resource] // ANSYS.COM. – Mode of access: <http://www.ansys.com/Products/Academic/ANSYS-Student>. – Date of access: 01.02.2017.
4. Ивашкин, А.Г. Анализ деформационного поведения моделей материалов в ANSYS / А.Г. Ивашкин // Математические методы и модели: теория, приложения и роль в образовании: Междунар. науч.-техн. конф. (г. Ульяновск, 28–30 апр. 2014 г.): сб. науч. тр. – Ульяновск, 2014. – С.79–92.
5. Heeres, O.M. A comparison between the Perzyna viscoplastic model and the Consistency viscoplastic model / O.M. Heeres, A.S. Suiker, R. Borst // European Journal of Mechanics – A/Solids. – 2002. – Vol. 21, iss. 1. – P. 1–12.
6. Kren, A.P. Determination of the critical stress intensity factor of glass under conditions of elastic contact by the dynamic indentation method / A.P. Kren // Strength of Materials. – 2009. – Vol. 41, № 6. – P. 628–636.
7. Джонсон, К.Л. Механика контактного взаимодействия / К.Л. Джонсон. – М.: Мир, 1989. – 510 с.
8. Рудницкий, В.А. Контроль физико-механических характеристик материалов и изделий по параметрам динамического деформирования: дис. ... д-ра техн. наук : 05.11.13 / В.А. Рудницкий. – Минск, 1992. – 355 с.
9. Leeb, D. Definition of the hardness value L in the EQUOTIP dynamic measuring method / D. Leeb // VDI Berichte. – 1986. – No. 583. – P. 109–133.
10. Рудницкий, В.А. Соотношение динамической и статической твердости металлов / В.А. Рудницкий, А.П. Крень, Г.А. Ланцман // Вес. Нац. акад. навук Беларусі. Сер. фіз.-тэхн. навук. – 2016. – № 4. – С. 16–22.
11. Инженерные методы исследования ударных процессов / Г.С. Батуев [и др.]. – М.: Машиностроение, 1977. – 240 с.

Заключение. Использование обычных динамических твердомеров, регистрирующих коэффициент восстановления скорости, возможно при толщине стенки трубы свыше 10–12 мм для обеспечения достаточной точности измерения. Измерение твердости консольных конструкций с их помощью возможно только в местах, к которым может быть приведена сосредоточенная масса или рядом с заделкой. В противном случае необходимо применять более совершенные приборы, например, ИПМ-1К, позволяющие регистрировать весь процесс удара и измерять такие параметры, как контактное усилие, глубина внедрения, время активного этапа удара. Это позволяет, используя градуировочные зависимости данных параметров и твердости, проводить ее измерение для нежестких конструкций в виде труб с толщиной стенки до 5 мм и на достаточно большом расстоянии (до 100 мм) от места жесткого закрепления – в случае проведения диагностики состояния консольных конструкций.

References

1. Lvovskij P. G. *Reference manual mechanic metallurgical plant*. Sverdlovsk, Metallurgizdat Publ., 1962. 980 p. (in Russian).
2. Markovec M. P. *Determination of mechanical properties of metal by hardness*. Moscow, Mashinostroenie Publ., 1979. 191 p. (in Russian).
3. Free Simulation Software Ansys. *ANSYS.COM*. Available at: <http://www.ansys.com/Products/Academic/ANSYS-Student> (Accessed 1 February 2017).
4. Ivashkin A. G. Analysis of deformation behavior of material models in ANSYS. *Matematicheskie metody i modeli: teoriya, prilozheniya i rol' v obrazovanii: Mezhdunar. nauch.-tekhn. konf. (g. Ulyanovsk, 28–30 apr. 2014 g.): sb. nauch. tr.* [Mathematical methods and models: theory, application and role in education: International Scientific-Technical Conference (Ulyanovsk, 28–30 April 2014): collection of scientific papers]. Ulyanovsk, 2014, pp. 79–92 (in Russian).
5. Heeres O. M., Suiker A. S., Borst R. A comparison between the Perzyna viscoplastic model and the Consistency viscoplastic model. *European Journal of Mechanics – A/Solids*, 2002, vol. 21, iss. 1, pp. 1–12. Doi: 10.1016/s0997-7538(01)01188-3
6. Kren A. P. Determination of the critical stress intensity factor of glass under conditions of elastic contact by the dynamic indentation method. *Strength of Materials*, 2009, vol. 41, no. 6, pp. 628–636. Doi: 10.1007/s11223-009-9172-x
7. Johnson K. L. *Contact Mechanics*. Moscow, Mir Publ., 1989. 510 p. (in Russian).
8. Rudnitsky V. A. *Control of physical and mechanical characteristics of materials and products according to the parameters of dynamic deformation*. Minsk, 1992. 355 p. (in Russian).
9. Leeb D. Definition of the hardness value L in the EQUOTIP dynamic measuring method. *VDI Berichte*, 1986, no. 583, pp. 109–133.
10. Rudnitsky V. A., Kren A. P., Lantsman G. A. Investigation of the ratio between the dynamic and static hardness of metals *Vestsi Natsyyanal'nai akademii navuk Belarusi. Seryya fizika-technichnykh navuk = Proceedings of the National Academy of Sciences of Belarus. Physical-technical series*, 2016, no. 4, pp. 19–22 (in Russian).
11. Batuev G. S., Golubkov Y. V., Efremov A. K., Fedosov A. A. *Engineering methods for studying impact processes*. Moscow, Mashinostroenie Publ., 1977. 240 p. (in Russian).

Информация об авторах

Крень Александр Петрович – доктор технических наук, заведующий лабораторией контактно-динамических методов контроля, Институт прикладной физики Национальной академии наук Беларуси (ул. Академическая, 16, 220072, Минск, Республика Беларусь). E-mail: alekspk@mail.ru

Рудницкий Валерий Аркадьевич – доктор технических наук, профессор, главный научный сотрудник, Институт прикладной физики Национальной академии наук Беларуси (ул. Академическая, 16, 220072, Минск, Республика Беларусь). E-mail: rudnitsky@iaph.bas-net.by

Зинькевич Николай Васильевич – аспирант, Институт прикладной физики Национальной академии наук Беларуси (ул. Академическая, 16, 220072, Минск, Республика Беларусь). E-mail: nickola.anelka@gmail.com

Information about the authors

Alexander P. Kren – D. Sc. (Engineering), Head of the Mechanical Testing Laboratory, Institute of Applied Physics of the National Academy of Science of Belarus (16, Akademicheskaya Str., 220072, Minsk, Republic of Belarus). E-mail: alekspk@mail.ru

Valery A. Rudnitsky – D. Sc. (Engineering), Professor, Institute of Applied Physics of the National Academy of Science of Belarus (16, Akademicheskaya Str., 220072, Minsk, Republic of Belarus). E-mail: rudnitsky@iaph.bas-net.by

Nikolay V. Zinkevich – Postgraduate Student, Institute of Applied Physics of the National Academy of Science of Belarus (16, Akademicheskaya Str., 220072, Minsk, Republic of Belarus). E-mail: nickola.anelka@gmail.com