

УДК 539.3

DOI: 10.32326/1814-9146-2020-82-2-135-146

РАЗВИТИЕ МЕТОДА ПРЯМОГО УДАРА ДЛЯ ОПРЕДЕЛЕНИЯ ДИАГРАММ ДЕФОРМИРОВАНИЯ УПРУГОПЛАСТИЧЕСКИХ МАТЕРИАЛОВ ПРИ БОЛЬШИХ ДЕФОРМАЦИЯХ*

© 2020 г. **Басалин А.В.¹, Константинов А.Ю.¹, Крушка Л.²**

¹*Научно-исследовательский институт механики
Национального исследовательского Нижегородского государственного
университета им. Н.И. Лобачевского, Нижний Новгород, Российская Федерация*
²*Военный технологический университет, Варшава, Польша*

constantinov.al@yandex.ru

Поступила в редакцию 11.04.2020

Приводятся описание и результаты анализа экспериментального метода, реализующего так называемую схему прямого удара, построенную на базе техники мерных стержней. Метод используется для определения диаграмм деформирования вязкопластических конструкционных материалов в условиях высокоскоростного сжатия при больших, чем в традиционном методе Кольского, скоростях деформаций. Особое внимание уделено варианту метода, в котором применяется ударник того же диаметра, как и у мерного стержня, поскольку в этом случае появляется возможность использования оборудования стандартной схемы испытаний по методу Кольского (в частности, нагружающих устройств) и, таким образом, на единой аппаратной платформе строится система базовых испытаний материалов в широком диапазоне скоростей деформаций. Выполнен численный анализ указанной схемы. Проводится сравнение характеристик процесса деформирования образца, зарегистрированных в расчете напрямую и определенных косвенно по информации с мерного стержня, доступной в натурном испытании. Показано, что деформация образца определяется точно лишь на временном интервале, соответствующем двойному пробегу упругой волны по ударнику. Предложена модификация алгоритма обработки информации, получаемой в этом эксперименте, учитывающая интерференцию упругих волн в ударнике и позволяющая расширить диапазон деформаций, для которого эксперимент дает достоверную информацию о кривой деформирования материала. Применение методики продемонстрировано на примере испытания образца из меди М1. Для указанного материала с использованием метода прямого удара получена кривая деформирования при скорости деформации порядка 10^4 с⁻¹. Показано, что традиционная схема обработки экспериментальных данных дает нефизичные завышенные значения деформации образца.

* Теоретические исследования выполнены при финансовой поддержке Министерством науки и высшего образования РФ (проект 0729-2020-0054). Экспериментальные исследования проводились при частичной финансовой поддержке грантом президента РФ для поддержки молодых ученых – докторов наук (проект МД-1221.2019.8).

Ключевые слова: скорость деформации, мерный стержень, пластическое деформирование, напряжение течения, численное моделирование, обоснование, эксперимент.

Введение

На современном этапе мирового развития техники основной задачей промышленности является создание в минимальные сроки конкурентоспособной и востребованной продукции нового поколения. Центральной и наиболее наукоемкой технологией, обеспечивающей конкурентоспособность продукции нового поколения, является компьютерный инжиниринг (Computer-Aided Engineering, CAE) [1]. Следует отметить, что наряду с развитием методов решения сложных инженерных задач актуальной является проблема обеспечения CAE-систем исходными данными, важнейшей частью которых являются математические модели, описывающие поведение материалов, из которых изготавливается проектируемое изделие [2, 3]. Именно определяющие соотношения во многом задают качество тождественности цифрового двойника реальному объекту. Для построения достоверного цифрового двойника изделия необходимо не только с достаточной детализацией описать его геометрические особенности, но и учесть все значимые эффекты, которые характеризуют поведение материалов, из которых сконструирован объект, в условиях его эксплуатации.

Так, для задач оценки прочности динамически нагруженных конструкций критическим является учет влияния скорости деформации на прочностные и деформационные характеристики материалов [4]. Экспериментальные схемы для исследования подобного влияния могут быть построены на базе техники мерных стержней. К таким методам относится, например, хорошо известный метод Кольского [5–13]. Численный анализ классического метода Кольского проводится в статьях [14–17]. Методические ограничения указанной экспериментальной схемы привели к необходимости разработки альтернативных вариантов для расширения диапазона исследования по реализуемым скоростям деформации. Анализ и развитию одной из таких схем посвящена настоящая статья.

Метод прямого удара

Диапазон скоростей деформаций, которые реализуются при использовании метода Кольского, ограничен в силу одного из основных условий методики – упругого деформирования мерных стержней. В указанной методике нагружение образца происходит через нагружающий мерный стержень. Максимальная скорость ударника, при которой в нагружающем мерном стержне формируется упругий импульс нагрузки, определяется условием:

$$V_{\max} = \frac{2c\sigma_T}{E}.$$

Здесь c – стержневая скорость звука в материале, E – модуль Юнга, σ_T – предел текучести. Предполагается, что ударник и мерный стержень выполнены из одного и того же материала и имеют одинаковые диаметры. Поэтому максимальная скорость деформации в эксперименте ограничена величиной:

$$\dot{\epsilon}_{\max} = V_{\max} / L_0,$$

где L_0 – длина образца.

На практике максимальная скорость ударника, пригодная для проведения испытаний, оказывается существенно меньше V_{\max} , поскольку большие амплитуды нагрузки в мерном стержне приводят к обрыву цепи тензорезисторов, устанавливаемых на поверхности нагружающего стержня. При этом не происходит регистрации сигнала и отсутствует возможность определить диаграмму деформирования. Амплитуда волн в опорном мерном стержне ограничена пределом текучести испытываемого материала, поэтому выбором размера образца можно существенно снизить нагрузку на опорный мерный стержень и обеспечить надежную регистрацию сигнала.

На этой идее основана схема прямого удара, при которой образец устанавливается на торце мерного стержня и нагружается ударником напрямую, без промежуточного мерного стержня. Подобная схема, названная методом прямого удара, была предложена в статье [18] для определения динамических свойств материалов при скоростях 10^3 – 10^4 с⁻¹. Значительно развил этот метод Я. Клепачко [19]. С тех пор метод прямого удара успешно используется исследователями для изучения поведения различных материалов при высоких скоростях деформации [20–22].

Существует несколько вариантов метода прямого удара. Две наиболее популярные схемы [19] представлены на рис. 1. В первой схеме используется массивный ударник, обладающий запасом кинетической энергии, превышающей во много раз работу упругопластического деформирования образца (рис. 1а). В этом случае скорость ударника считается постоянной или медленно меняющейся на протяжении всего процесса деформирования образца, а процесс нагружения образца имеет инерционный характер. Во второй схеме используется ударник значительно меньшей массы и того же диаметра, что и мерный стержень (рис. 1б). Процесс нагружения при этом является волновым.

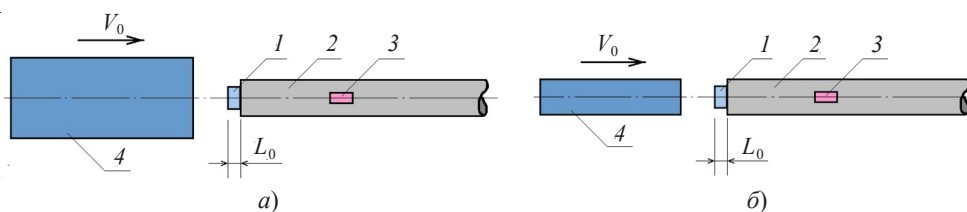


Рис. 1. Схемы двух вариантов метода прямого удара

В обоих вариантах метода прямого удара испытуемый образец 1 длиной L_0 располагается на торце длинного и тонкого мерного стержня 2 с высоким пределом текучести и по нему наносится удар бойком 4 со скоростью V_0 от нескольких метров в секунду до нескольких десятков метров в секунду. В ходе испытания с использованием тензодатчиков 3 регистрируется импульс деформации в некотором сечении мерного стержня, который позволяет определить напряжение в образце. Важным параметром, используемым при построении кривой деформирования по данным указанного эксперимента, является скорость ударника, которая также должна регистрироваться в каждом испытании.

Следует иметь в виду, что в первом варианте (см. рис. 1а) при испытаниях высокопрочных материалов метод прямого удара дает значительные погрешности при определении деформаций образца в силу нарушения предположения о постоянстве скорости ударника в процессе нагружения, особенно на начальном участке диаграммы (до 5–7%). Для того чтобы избежать этого недостатка, Я. Клепачко предло-

жил методику регистрации перемещений границы ударник–образец с использованием оптического датчика. В последние годы разработаны экспериментальные схемы, позволяющие регистрировать изменение скорости ударника в процессе эксперимента, что существенно улучшает информативность метода и повышает его точность [19].

В лаборатории динамических испытаний материалов НИИ механики ННГУ для определения кривых деформирования при скоростях деформации свыше 10^3 с^{-1} выбрана вторая схема (см. рис. 1б). Это обусловлено возможностью использования оборудования стандартной схемы испытаний по методу Кольского, поскольку при этом можно применять те же самые нагружающие устройства. Условия эксперимента подбираются так, чтобы образец деформировался упругопластически, а ударник и мерный стержень – упруго.

Скорость границы контакта образца и опорного стержня определяется, как и в случае использования метода разрезного стержня Гопкинсона (РСГ), по импульсу упругой деформации $\varepsilon_T(t)$ в мерном стержне:

$$V_1(t) = c\varepsilon_T(t), \quad (1)$$

где c – скорость звука в мерном стержне.

При ударе в ударнике распространяется точно такая же волна, что и в мерном стержне. Это позволяет определить среднюю скорость изменения длины образца с использованием зарегистрированного в мерном стержне импульса деформации $\varepsilon_T(t)$ по формуле [19]:

$$V_s(t) = V_0 - 2c\varepsilon_T(t), \quad (2)$$

где V_s – скорость изменения длины образца. Таким образом, средняя скорость деформации в образце равна:

$$\dot{\varepsilon}(t) = \frac{V_s}{L_0}. \quad (3)$$

Тогда средняя техническая деформация в образце определяется следующим образом:

$$\varepsilon(t) = \frac{1}{L_0} \left(V_0 t - 2c \int_0^t \varepsilon_T(\tau) d\tau \right). \quad (4)$$

Среднее техническое напряжение в образце рассчитывается по формуле:

$$\sigma(t) = E \left(\frac{D_b}{D_s} \right)^2 \varepsilon_T(t). \quad (5)$$

Здесь E – модуль Юнга мерного стержня, D_b и D_s – диаметры мерного стержня и образца соответственно.

Численный анализ схемы

Численная оценка однородности и одномерности напряженно-деформированного состояния образца в методе прямого удара при наличии сил трения проводилась в [23]. В настоящей статье проводились численные эксперименты с целью оценки точности и определения границ применимости формул для расчета деформаций

и напряжений в образце с использованием зависимостей (1)–(5). На рис. 2 показан фрагмент модели. Задача решалась в осесимметричной постановке с использованием САЕ-пакета Abaqus Student Edition. Поведение материалов мерного стержня и ударника описывалось линейной упругой моделью с параметрами: плотность 7800 кг/м^3 , модуль Юнга 200 ГПа , коэффициент Пуассона $0,28$, скорость звука в стержне 5065 м/с ; длина ударника 300 мм , длина мерного стержня $1,5 \text{ м}$, диаметры ударника и мерного стержня 20 мм . Поведение материала образца описывалось упругопластической билинейной моделью с параметрами: плотность 2600 кг/м^3 , модуль Юнга 70 ГПа , коэффициент Пуассона $0,33$, предел текучести 260 МПа , модуль упрочнения 1000 МПа ; высота образца 5 мм , диаметр 10 мм . Начальная скорость ударника $V_0 = 30 \text{ м/с}$. На рис. 2 обозначено: V_1 – массовая скорость движения правого торца ударника (левого торца образца), V_2 – массовая скорость левого торца мерного стержня (правого торца образца).

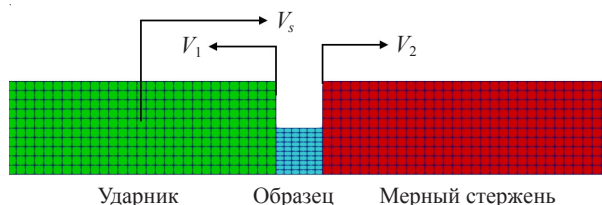


Рис. 2. Фрагмент модели

В процессе расчета определялись импульс осевой деформации в мерном стержне (аналогично натурному испытанию), а также силы на контакте образец–мерный стержень, скорости смещения интерфейсов взаимодействия ударник–образец и образец–мерный стержень, закон изменения длины образца, деформации в образце. Сравнение сил, определенных в виртуальном эксперименте напрямую регистрацией контактного усилия (торец) и рассчитанных по импульсу в мерном стержне (мерный стержень), приводится на рис. 3. Видно, что кривые практически совпадают. Отличие наблюдается в наклоне переднего фронта временной зависимости: начальный участок на кривой, определенной по импульсу деформации в мерном стержне, более пологий. Кроме того, на графике силы, рассчитанной по импульсу деформации в мерном стержне, присутствуют колебания. Оба эффекта связаны с дисперсией волны в упругом стержне конечного диаметра. Подробное описание этого эффекта с соответствующим анализом приводится в [24, 25].

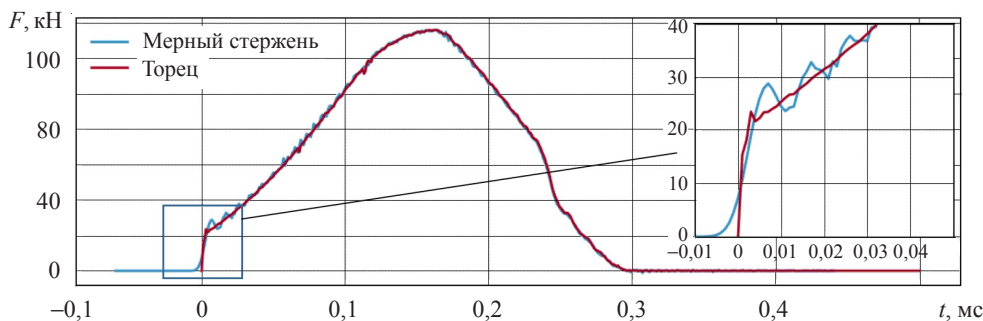


Рис. 3. Сравнение сил

На рис. 4 приводится сравнение скоростей на границах образца, полученных прямой регистрацией в процессе расчета (численное моделирование) и определенных по формуле (1) на основании импульса, зарегистрированного в мерном стержне (теоретический расчет). На рис. 4а сравниваются истории для левого торца образца (контакт с ударником), на рис. 4б – для правого торца (контакт со стержнем). На рисунке обозначено: синие линии – численное моделирование, красные – теоретический расчет. Видно, что закон движения правого торца восстанавливается достаточно точно на протяжении всего нагружения образца. В то же время формула (1) дает относительно точную оценку скорости контакта ударник–образец лишь на временном интервале, соответствующем двум пробегам волны по ударнику (черная вертикальная линия на рисунке). После этого на движение торца ударника оказывает влияние волна, вернувшаяся после отражения от его свободного торца.

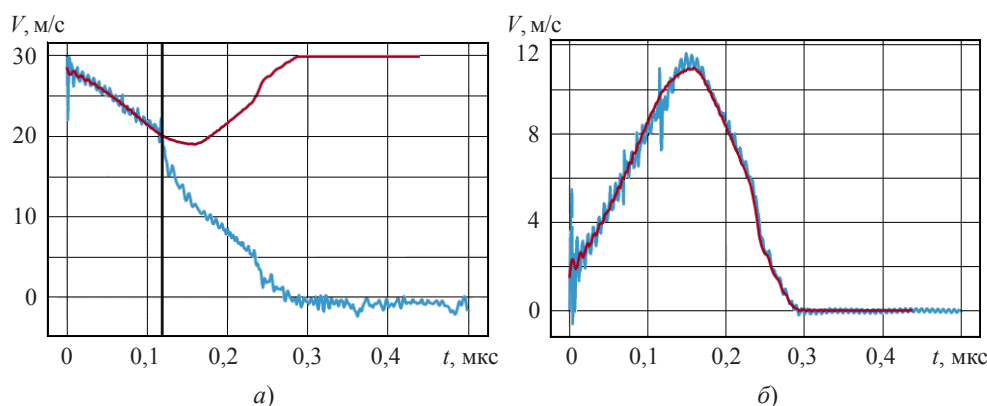


Рис. 4. Сравнение скоростей на границах образца

Модифицированная процедура обработки данных

Для расширения области, в которой метод позволяет получить корректный результат, а значит для расчета кривой деформирования в большем диапазоне деформаций, разработана модифицированная процедура обработки экспериментальной информации. Она заключается в том, что для определения скорости интерфейса ударник–образец используется модифицированный импульс, который получается добавлением к исходному сигналу импульсов, отразившихся от свободного торца ударника, то есть

$$\varepsilon^{\text{mod}}(t) = \varepsilon_T(t) + \sum_{i=1}^N 2\varepsilon_T\left(t + 2i \frac{L_{\text{уд}}}{c}\right),$$

здесь $L_{\text{уд}}$ – длина ударника, c – скорость звука в материале ударника.

Описанная процедура иллюстрируется на рис. 5. К исходному сигналу 1 добавляется удвоенный импульс, смещенный на два пробега волны в ударнике 2, и удвоенный импульс, смещенный на четыре пробега волны в ударнике 3. В итоге получается импульс 4.

Скорость V_1 рассчитывается по формуле:

$$V_1(t) = c\varepsilon^{\text{mod}}(t).$$

Сравнение скоростей на границе образец–ударник, полученных напрямую из

численного моделирования и с использованием модифицированной процедуры, приводится на рис. 6. На рисунке синей линией обозначено численное моделирование, красной – теоретический расчет. Видно, что применение разработанной схемы позволяет точно рассчитать скорость границы ударник–образец на всем интервале активного нагружения образца.

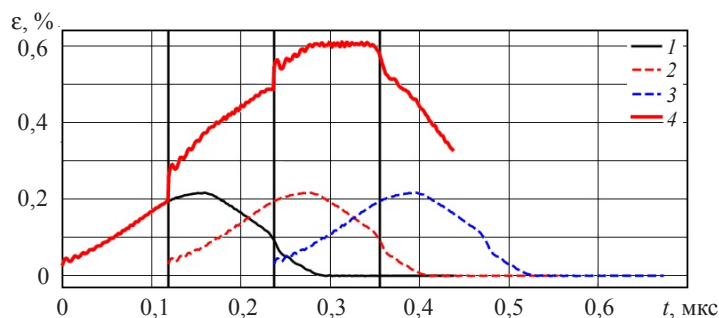


Рис. 5. Расчет модифицированного сигнала

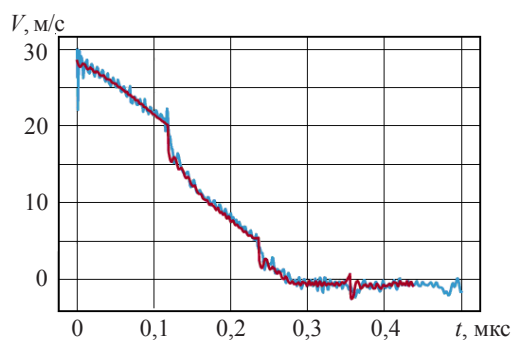


Рис. 6. Скорости на границе образец–ударник

Теперь формула для определения скорости изменения длины образца запишется в виде:

$$V_s(t) = V_0 - c\varepsilon_T(t) - c\varepsilon^{\text{mod}}(t).$$

Скорости деформаций, деформации и напряжения в образце определяются по формулам (3), (4) и (5).

С использованием метода прямого удара проведен эксперимент по динамическому нагружению образца из меди М1, полученного из прутка диаметром 10 мм. Образец нагружался ударником длиной 150 мм со скоростью 47 м/с. Использовались высокопрочные стальные ударник и мерный стержень. Результаты испытания представлены на рис. 7. На рис. 7а показаны временные зависимости скорости деформации (штриховая линия) и технической деформации образца (сплошная линия). Синим цветом обозначены кривые, построенные с использованием стандартной, а красным – модифицированной процедуры обработки экспериментальной информации. Вертикальные черные линии обозначают время, соответствующее двум и четырем пробегам волны по ударнику. Можно отметить, что после двух пробегов волны по ударнику стандартная процедура обработки дает завышенное значение скорости деформации, а значения самой деформации могут превышать единицу, что нефизично. На рис. 7б показаны диаграммы деформирования. Сплошные ли-

нии отвечают зависимостям напряжений от пластической деформации образца (левая вертикальная шкала). Штриховые линии иллюстрируют изменение скорости деформации образца (правая вертикальная шкала) в процессе сжатия. Можно отметить, что при достижении отраженной волны в ударнике границы контакта с образцом происходит заметное снижение скорости деформации. Максимальная скорость деформации образца в эксперименте составила $\sim 10^4 \text{ с}^{-1}$.

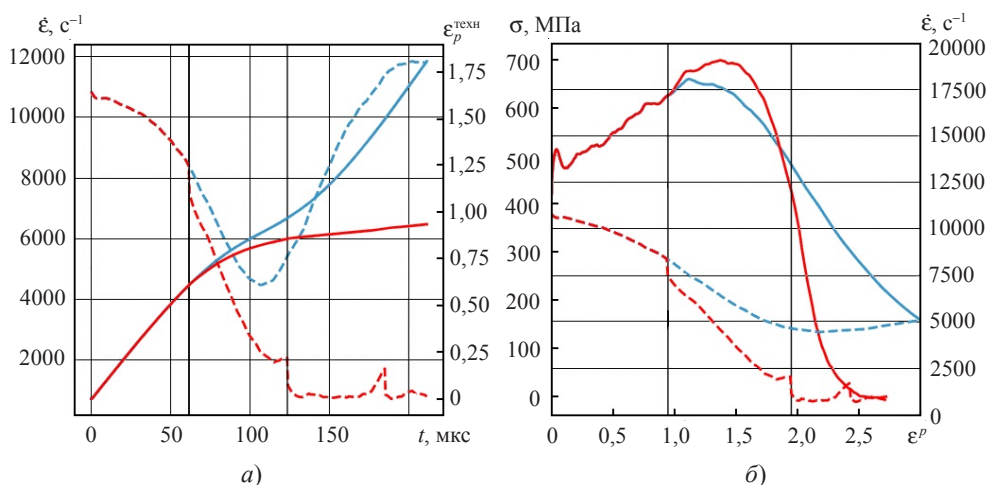


Рис. 7. Результаты испытания меди М1

Заключение

Приведено описание метода прямого удара, основанного на технике мерных стержней. Эта методика совместно с другими методами экспериментального исследования, такими как стандартные статические испытания и метод разрезного стержня Гопкинсона, позволяет получать информацию о скоростной зависимости прочностных и деформационных свойств конструкционных материалов в широком диапазоне скоростей деформаций. Выполненный численный анализ схемы позволил выявить область ее применимости и сформулировать границы, в рамках которых описанная схема дает достоверный результат. Предложена модификация процедуры обработки экспериментальных данных, которая снимает указанное ограничение. С применением описанной методики получена диаграмма деформирования образца из меди М1 при скорости деформации порядка 10^4 с^{-1} до степени деформации 1,5.

Список литературы

1. Боровков А.И. и др. *Компьютерный инжиниринг: Учебное пособие*. СПб.: СПбПУ, 2012. 93 с.
2. Виленский О.Ю., Константинов А.Ю., Лапшин Д.А., Малыгин М.Г., Пристром С.А. Расчетный анализ прочности катковых опор при падении балки перекрытия на корпус реактора БН-600. *Проблемы прочности и пластичности*. 2016. Т. 78. №4. С. 359–367. DOI: <https://doi.org/10.32326/1814-9146-2016-78-4-359-367>.
3. Брагов А.М., Константинов А.Ю., Лапшин Д.А., Новосельцева Н.А., Татарский А.М., Татарский Ю.Н., Ламзин Д.А. Применение комплексного подхода к решению задач прочности элеватора реакторной установки БН-800 для аварийного случая схода каретки. *Проблемы прочности и пластичности*. 2018. Т. 80. №1. С. 72–82. <https://doi.org/10.32326/1814-9146-2018-80-1-72-82>.

4. Salvado F.C., Teixeira-Dias F., Walley S.M., Lea L.J., Cardoso J.B. A review on the strain rate dependency of the dynamic viscoplastic response of FCC metals. *Progress in Materials Science*. 2017. Vol. 88. P. 186–231. <https://doi.org/10.1016/j.pmatsci.2017.04.004>.
5. Kolsky H. An investigation of the mechanical properties of materials at very high rates of loading. *Proceedings of the Physical Society. Section B*. 1949. Vol. 62. No 11. P. 676–700. <https://doi.org/10.1088/0370-1301/62/11/302>.
6. Davies R.M. A critical study of the Hopkinson pressure bar. *Philosophical Transactions of the Royal Society of London Series A. Mathematical and Physical Sciences*. 1948. Vol. 240. Iss. 821. P. 375–457. <http://dx.doi.org/10.1098/rsta.1948.0001>.
7. Gama B.A., Lopatnikov S.L., Gillespie J.W.Jr. Hopkinson bar experimental technique: A critical review. *Applied Mechanics Reviews*. 2004. Vol. 57. No 4. P. 233–250. DOI: 10.1115/1.1704626.
8. Gray III G.T. Classic split-Hopkinson pressure bar testing. In: *ASM Handbook. Vol. 8: Mechanical Testing and Evaluation*. Eds. H. Kuhn, D. Medlin. Ohio: ASM Int, 2000. P. 462–476.
9. Брагов А.М., Ломунов А.К. Особенности построения диаграмм деформирования методом Кольского. *Прикладные проблемы прочности и пластичности*. 1984. Вып. 28. С. 125–137.
10. Ломунов А.К. Методика исследования процессов вязкопластического деформирования и свойств материала на базе разрезного стержня Гопкинсона: *Дисс... канд. техн. наук*. Горький, 1987. 231 с.
11. Eskandari H., Nemes J.A. Dynamic testing of composite laminates with a tensile split hopkinson bar. *Journal of Composite Materials*. 2000. Vol. 34. Iss. 4. P. 260–273. <https://doi.org/10.1177/002199830003400401>.
12. Caverzan A., Cadoni E., di Prisco M. Tensile behaviour of high performance fibre-reinforced cementitious composites at high strain rates. *International Journal of Impact Engineering*. 2012. Vol. 45. P. 28–38. DOI: 10.1016/j.ijimpeng.2012.01.006.
13. Jiang B., Zhang R. Tensile properties in the through-thickness direction for a carbon fiber woven reinforced composite at impact loading rate. *Journal de Physique IV (Proceedings)*. 2006. Vol. 134. P. 1071–1075. <https://doi.org/10.1051/jp4:2006134164>.
14. Zhang J.-H., Shang B. Numerical study of the data processing methods in SHPB experiments. *Chinese Journal of High Pressure Physics*. 2016. Vol. 30. No 3. P. 213–220.
15. Donghai Wang, Hong Zhang, Yuwen Zhang. Numerical simulation of SHPB experimental process based on ANSYS software. *International Journal of Mechanics Research*. 2019. Vol. 8. P. 39–46. DOI: 10.12677/IJM.2019.81005.
16. Dvořák R., Koudelka P., Fíla T. Numerical modelling of wave shapes during SHPB measurement. *Acta Polytechnica CTU Proceedings*. 2019. Vol. 25. P. 25–31. <http://dx.doi.org/10.14311/APP.2019.25.0025>.
17. Kariem M.A., Beynon J.H., Ruan D. Misalignment effect in the split Hopkinson pressure bar technique. *International Journal of Impact Engineering*. 2012. Vol. 47. P. 60–70.
18. Dharan C.K.H., Hauser F.E. Determination of stress-strain characteristics at very high strain rates. *Experimental Mechanics*. 1970. Vol. 10. P. 370–376. DOI: 10.1007/BF02320419.
19. Klepaczko J. Advanced experimental techniques in material testing. In: *Trends in Mechanics of Materials. Vol. 3. New Experimental Methods in Material Dynamics and Impact*. Eds. W.K. Nowacki, J.R. Klepachko. Warsaw, 2001. P. 1–58.
20. Cowie T., Gurnham C.W.A., Braithwaite C.H., Lea L. Impact performance of aluminium foams in a direct impact Hopkinson bar. *AIP Conference Proceedings*. 1979. 110003. DOI: 10.1063/1.5044922.
21. Guo X., Sow C., Khalil C., Heuzé T., Racineux G. Material constitutive behavior identification at high strain rates using a direct-impact Hopkinson device. *7th International Conference on High Speed Forming*. April 27-28 2016. Dortmund, Germany. DOI: 10.17877/DE290R-16985.
22. Couque H. The use of the direct impact Hopkinson pressure bar technique to describe thermally activated and viscous regimes of metallic materials. *Philosophical Transactions of the Royal Society A. Mathematical Physical and Engineering Sciences*. 2014. Vol. 372. Iss. 2023. 20130218. DOI: 10.1098/rsta.2013.0218.
23. Константинов А.Ю. Экспериментально-расчетное исследование поведения конст-

рукционных материалов под действием динамических нагрузок: *Дисс... канд. техн. наук.* Нижний Новгород, 2007. 144 с.

24. Gong J.C., Malvern L.E., Jenkins D.A. Dispersion investigation in the split Hopkinson pressure bar. *ASME Journal of Engineering Materials and Technology*. 1990. Vol. 112. Iss. 3. P. 309–314. DOI:10.1115/1.2903329.

25. Bragov A.M., Lomunov A.K., Lamzin D.A. et al. Dispersion correction in split-Hopkinson pressure bar: theoretical and experimental analysis. *Continuum Mechanics and Thermodynamics*. 2019. DOI: 10.1007/s00161-019-00776-0.

References

1. Borovkov A.I. et al. *Kompyuternyy inzhiniring [Computer Engineering]*. Saint Petersburg. SPBPU Publ. 2012. 93 p. (In Russian).

2. Vilenskiy O.Yu., Konstantinov A.Yu., Lapshin D.A., Malygin M.G., Pristrom S.A. Raschetnyy analiz prochnosti katkovykh opor pri padenii balkiperekrytiya na korpus reaktora BN-600 [Computational Analysis of Roller Supports Strength under Roof Slab Block Drop on the BN-600 Reactor]. *Problemy prochnosti i plastichnosti [Problems of Strength and Plasticity]*. 2016. Vol. 78. No 4. P. 359–367 (In Russian).

3. Bragov A.M., Konstantinov A.Yu., Lapshin D.A., Novosel'tseva N.A., Tatarskiy A.M., Tatarskiy Yu.N., Lamzin D.A. Primenenie kompleksnogo podkhoda k resheniyu zadach prochnosti elevatora reaktornoy ustanovki BN-800 dlya avariynogo sluchaya skhoda karetki [A system approach for strength problem solution of the BN-800 reactor plant elevator for an emergency case of carriage running-off]. *Problemy prochnosti i plastichnosti [Problems of Strength and Plasticity]*. 2018. Vol. 80 No 1. P. 72–82. <https://doi.org/10.32326/1814-9146-2018-80-1-72-82> (In Russian).

4. Salvado F.C., Teixeira-Dias F., Walley S.M., Lea L.J., Cardoso J.B. A review on the strain rate dependency of the dynamic viscoplastic response of FCC metals. *Progress in Materials Science*. 2017. Vol. 88. P. 186–231. <https://doi.org/10.1016/j.pmatsci.2017.04.004>.

5. Kolsky H. An investigation of the mechanical properties of materials at very high rates of loading. *Proc. Phys. Soc. Sect. B*. 1949. Vol. 62. No 11. P. 676–700. <https://doi.org/10.1088/0370-1301/62/11/302>.

6. Davies R.M. A critical study of the Hopkinson pressure bar. *Philos. Trans. R. Soc. Ser. A*. 1948. Vol. 240. Iss. 821. P. 375–457. <http://dx.doi.org/10.1098/rsta.1948.0001>.

7. Gama B.A., Lopatnikov S.L., Gillespie J.W.Jr. Hopkinson bar experimental technique: A critical review. *Appl. Mech. Rev.* 2004. Vol. 57. No 4. P. 233–250. DOI: 10.1115/1.1704626.

8. Gray III G.T. Classic split-Hopkinson pressure bar testing. In: *ASM Handbook. Vol. 8: Mechanical Testing and Evaluation*. Eds. H. Kuhn, D. Medlin. Ohio. ASM Int. 2000. P. 462–476.

9. Bragov A.M., Lomunov A.K. Osobennosti postroyeniya diagramm deformirovaniya metodom Kol'skogo [Features of the construction of strain diagrams by the Kolsky method]. *Prikladnye problemy prochnosti i plastichnosti [Applied Problems of Strength and Plasticity]*. 1984. Iss. 28. P. 125–137 (In Russian).

10. Lomunov A.K. Metodika issledovaniya protsessov vyzkoplasticheskogo deformirovaniya i svoystv materiala na baze razreznogo sterzhnya Gopkinsona [Methodology for studying the processes of viscoplastic deformation and material properties based on the split Hopkinson bar]. *Diss... kand. tekhn. nauk [PhD Thesis]*. 1987. 231 p. (In Russian).

11. Eskandari H., Nemes J.A. Dynamic testing of composite laminates with a tensile split hopkinson bar. *J. Compos. Mater.* 2000. Vol. 34. Iss. 4. P. 260–273. <https://doi.org/10.1177/002199830003400401>.

12. Caverzan A., Cadoni E., di Prisco M. Tensile behaviour of high performance fibre-reinforced cementitious composites at high strain rates. *Int. J. Impact. Eng.* 2012. Vol. 45. P. 28–38. DOI: 10.1016/j.ijimpeng.2012.01.006.

13. Jiang B., Zhang R. Tensile properties in the through-thickness direction for a carbon fiber woven reinforced composite at impact loading rate. *J. Phys. IV (Proceedings)*. 2006. Vol. 134. P. 1071-1075. <https://doi.org/10.1051/jp4:2006134164>.

14. Zhang J.-H., Shang B. Numerical study of the data processing methods in SHPB experiments. *Chinese Journal of High Pressure Physics*. 2016. Vol. 30. No 3. P. 213–220.

15. Donghai Wang, Hong Zhang, Yuwen Zhang. Numerical simulation of SHPB experimental process based on ANSYS software. *International Journal of Mechanics Research*. 2019. Vol. 8. P. 39–46 (In Chinese). DOI: 10.12677/IJM.2019.81005.
16. Dvořák R., Koudelka P., Fíla T. Numerical modelling of wave shapes during SHPB measurement. *Acta Polytechnica CTU Proceedings*. 2019. Vol. 25. P. 25–31. <http://dx.doi.org/10.14311/APP.2019.25.0025>.
17. Kariem M.A., Beynon J.H., Ruan D. Misalignment effect in the split Hopkinson pressure bar technique. *Int. J. Impact. Eng.* 2012. Vol. 47. P. 60–70.
18. Dharan C.K.H., Hauser F.E. Determination of stress-strain characteristics at very high strain rates. *Exp. Mech.* 1970. Vol. 10. P. 370–376. DOI: 10.1007/BF02320419.
19. Klepaczko J. Advanced experimental techniques in material testing. In: *Trends in Mechanics of Materials. Vol. 3. New Experimental Methods in Material Dynamics and Impact*. Eds. W.K. Nowacki, J.R. Klepachko. Warsaw. 2001. P. 1–58.
20. Cowie T., Gurnham C.W.A., C.H. Braithwaite, L. Lea. Impact performance of aluminium foams in a direct impact Hopkinson bar. *AIP Conference Proceedings*. 1979. 110003. DOI: 10.1063/1.5044922.
21. Guo X., Sow C., Khalil C., Heuzé T., Racineux G. Material constitutive behavior identification at high strain rates using a direct-impact Hopkinson device. *7th International Conference on High Speed Forming*. April 27-28 2016. Dortmund. Germany. DOI: 10.17877/DE290R-16985.
22. Couque H. The use of the direct impact Hopkinson pressure bar technique to describe thermally activated and viscous regimes of metallic materials. *Philosophical Transactions of the Royal Society A. Mathematical Physical and Engineering Sciences*. 2014. Vol. 372. Iss. 2023. 20130218. DOI: 10.1098/rsta.2013.0218.
23. Konstantinov A. Yu. Eksperimentalno-raschetnoe issledovanie povedeniya konstruktsionnykh materialov pod deystviem dinamicheskikh nagruzok [Experimental and calculated study of the behavior of structural materials under the action of dynamic loads]. *Diss... kand. tekhn. nauk [PhD Thesis]*. Nizhny Novgorod. 2007. 144 p. (In Russian).
24. Gong J.C., Malvern L.E., Jenkins D.A. Dispersion investigation in the split Hopkinson pressure bar. *ASME J. Eng. Mater. Technol.* 1990. Vol. 112. Iss. 3. P. 309–314. DOI:10.1115/1.2903329.
25. Bragov A.M., Lomunov A.K., Lamzin D.A. et al. Dispersion correction in split-Hopkinson pressure bar: theoretical and experimental analysis. *Continuum Mech. Thermodyn.* 2019. DOI: 10.1007/s00161-019-00776-0.

DEVELOPMENT OF DIRECT IMPACT METHOD FOR DETERMINING DIAGRAMS OF DEFORMATION OF ELASTOPLASTIC MATERIALS AT LARGE DEFORMATIONS

Basalin A.V.¹, Konstantinov A.Yu.¹, Kruszka L.²

¹*Research Institute for Mechanics, National Research Lobachevsky State University of Nizhny Novgorod, Nizhny Novgorod, Russian Federation*

²*Military University of Technology, Warsaw, Poland*

The description and results of the analysis of the experimental method that implements the so-called direct impact scheme built on the basis of the measuring bar technique are presented. This method is used to determine the deformation diagrams of viscoplastic structural materials under conditions of high-speed compression at higher strain rates than in the traditional Kolsky method. Particular attention is paid to a variant of the method in which a striker of the same diameter as the measuring bar is used. In this case, it becomes possible to use equipment of the standard test scheme according to the Kolsky method (in particular, loading devices). Thus, a system of basic testing of materials in a wide range of strain rates is built on a single hardware platform. A numerical analysis of this method is performed. A comparison is made of the characteristics of the sample deformation calculated directly in the numerical simulation and determined indirectly from the

information from the measuring bar available in the full-scale test. It is shown that the deformation of the sample is determined precisely only on the time interval corresponding to the double run of the elastic wave along the impactor. A modification of the algorithm for processing the information obtained in this experiment is proposed, taking into account the interference of elastic waves in the impactor and allowing expanding the strain range for which this experiment provides reliable information about the material deformation curve. The work of the technique is demonstrated by the example of testing a sample of M1 copper. For this material, using the direct impact method, a deformation curve is constructed at a strain rate of the order of 10^4 s^{-1} . It is shown that the traditional experimental data processing scheme gives unphysical overestimated values of the sample deformation.

Keywords: strain rate, measuring bar, plastic deformation, flow stress, numerical simulation, justification, experiment.