

УДК 539.4

## О НОВОМ СПОСОБЕ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОГО ИССЛЕДОВАНИЯ МАТЕРИАЛОВ НА ДИНАМИЧЕСКИЙ СДВИГ ПРИ ВЫСОКОСКОРОСТНОМ ДЕФОРМИРОВАНИИ\*

© 2018 г. **Моссаковский П.А.<sup>1</sup>, Костырева Л.А.<sup>1,2</sup>**

<sup>1</sup>НИИ механики Московского государственного университета  
им. М.В. Ломоносова, Москва, Российская Федерация

<sup>2</sup>НПЦ газотурбостроения «Салют», Москва, Российская Федерация

pavel\_mossakovsky@mail.ru

*Поступила в редакцию 28.11.2017*

Предложена и математически обоснована новая модификация метода Кольского, основанная на классической схеме испытания на сжатие, позволяющая исследовать динамические процессы простого и чистого сдвига вплоть до разрушения для широкого класса материалов, включая высокопрочные металлы и сплавы. Показано, что рассмотренная испытательная схема позволяет реализовать в рабочей части образца из испытуемого материала близкое к однородному сдвиговое напряженно-деформированное состояние и может быть эффективно применена для исследований определяющих соотношений и критериев разрушения материалов. Получены общие соотношения, связывающие между собой сдвиговые напряжения и деформации и переходящие при равенстве продольных сил, действующих на образец, в форму, аналогичную соотношениям классического метода Кольского.

*Ключевые слова:* разрезной стержень Гопкинсона, метод Кольского, динамические свойства материалов, разрушение, простой сдвиг, чистый сдвиг.

### **Введение**

В настоящее время метод Кольского с разрезным стержнем Гопкинсона (РСГ) [1–5], включая его многочисленные модификации [6–11], является наиболее широко используемым инструментом для экспериментального исследования динамического поведения материалов различной природы в условиях высокоскоростного деформирования в диапазоне скоростей деформации  $10^2$ – $10^4$  с<sup>-1</sup>. В общем объеме такого рода исследований доля работ, посвященных изучению процессов динамического сдвига, относительно невелика и в особенности применительно к высокопрочным металлам и сплавам [12–18]. Этот факт во многом связан с определенными ограничениями существующих экспериментальных методик. В частности, в методе кольцевого сдвига [8] не всегда достижимо предельное состояние в образце из-за значительной площади поверхности среза. Это же замечание относится к экспериментам на динамическое кручение [17]. Также к недостаткам метода кольцевого

---

\* Выполнено при частичном финансировании РФФИ (грант №17-08-00334).

го сдвига следует отнести сложность формы испытуемого образца и связанные с этим проблемы с его изготовлением из твердых материалов. Существенным ограничением использования методики динамического кручения является необходимость применения специального привода для предварительного закручивания передающего мерного стержня, что не всегда реализуемо в лабораторных условиях.

Предлагаемый в статье способ испытаний на динамический сдвиг является модификацией классической схемы метода Кольского на одноосное сжатие с использованием двух мерных высокопрочных стержней. Схема дополнительно включает в себя сборку, состоящую из двух переходников из материала, сходного по свойствам с материалом мерных стержней, и образца в форме условного двутавра из исследуемого материала. Общий вид сборки, расположенной между мерными стержнями, изображен на рис. 1.

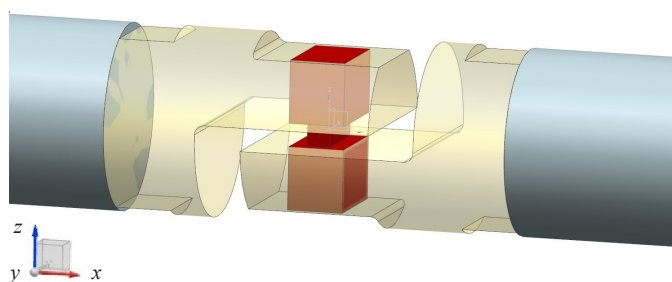


Рис. 1

Эта конструкция позволяет обеспечить реализацию в рабочей области образца напряженно-деформированного состояния (НДС), близкого к однородному, вплоть до разрушения в режимах простого (по деформациям) или чистого (по напряжениям) сдвигов. В первом случае при запрете проскальзывания образца вдоль стенок сборки (шероховатые стенки) все компоненты тензора деформаций, за исключением сдвиговой, равны нулю ( $\epsilon_{13} = \gamma/2 \neq 0$ , параметр вида деформированного состояния равен нулю). Во втором случае в условиях гладких стенок и допустимости проскальзывания единственной ненулевой является сдвиговая компонента тензора напряжений ( $\tau_{13} = \tau \neq 0$ , параметр вида напряженного состояния равен нулю). Величина сдвигового напряжения  $\tau$  в рассматриваемом случае пропорциональна отношению площади мерного стержня к площади поверхности сдвига образца, что в силу малости последней позволяет эффективно исследовать процессы сдвига в твердых материалах вплоть до разрушения. Другим достоинством предложенного подхода является возможность альтернативного измерения деформаций в образце с помощью DIC (Digital Image Correlation) системы визуализации полей перемещений и деформаций на видимой поверхности образца с использованием высокоскоростной видеосъемки.

## 1. Описание метода

В соответствии со стандартной схемой испытания на сжатие по методу Кольского с разрезным стержнем Гопкинсона сборка из двух переходников со вставленным в них образцом, жестко фиксируемая между мерными стержнями, подвергается совместному воздействию трех импульсов продольных деформаций в стержнях: нагружающего импульса  $\epsilon^I(t)$  трапецидальной формы длительности  $t^{imp}$ , отраженного  $\epsilon^R(t)$  и проходящего  $\epsilon^T(t)$  импульсов. Полагая, что сборка может деформиро-

ваться только в рабочей зоне образца, и в предположении об однородности получаемого НДС запишем основные соотношения метода в соответствии со схемой нагружения образца (рис. 2).

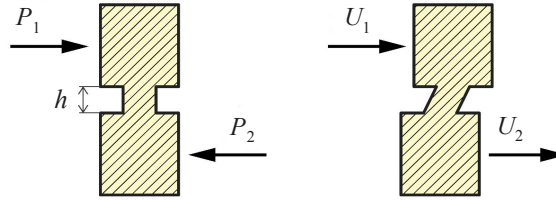


Рис. 2

Из равенства работ внешних и внутренних сил за время  $\delta t$  следует:

$$P_1(t)v_1(t) - P_2(t)v_2(t) = \int_{V_s} \sigma_{ij} \dot{\varepsilon}_{ij} dV = \tau \dot{\gamma} V_s, \quad (1)$$

где  $P_1, P_2, v_1, v_2, U_1 = v_1 \delta t, U_2 = v_2 \delta t$  – силы, скорости и перемещения на торцах нагружающего и опорного стержней соответственно;  $\sigma_{ij}, \dot{\varepsilon}_{ij}, \varepsilon_{ij}$ , – компоненты тензора напряжений Коши, скоростей деформаций и деформаций в ортонормированном репере  $\bar{k}$ , сопровождающем естественный лагранжев репер  $\bar{y}$ , определяемый сторонами косоугольного параллелепипеда рабочей области образца\*;  $\tau = \sigma_{13}, \gamma(t) = 2\varepsilon_{13} = (U_1(t) - U_2(t))/h$  – сдвиговое напряжение и удвоенная сдвиговая деформация;  $A_s, h, V_s = A_s h$  – площадь поверхности сдвига, высота и объем рабочей области.

С учетом известных соотношений метода Кольского получим:

$$\begin{aligned} v_1(t) &= C(\varepsilon^I(t) - \varepsilon^R(t)), & U_1(t) &= C \int_0^{t^{imp}} (\varepsilon^I(t) - \varepsilon^R(t)) dt, \\ v_2(t) &= C\varepsilon^T(t), & U_2(t) &= C \int_0^{t^{imp}} \varepsilon^T(t) dt, \\ P_1(t) &= EA(\varepsilon^I(t) + \varepsilon^R(t)), & P_2(t) &= EA\varepsilon^T(t). \end{aligned}$$

Здесь  $C, E, A$  – скорость звука, модуль Юнга и площадь поперечного сечения в мерных стержнях.

Из этих соотношений и формулы (1) следуют выражения для искомых параметров  $\tau$  и  $\gamma$ :

$$\tau = \frac{EA\{(\varepsilon^I)^2 - (\varepsilon^R)^2 - (\varepsilon^T)^2\}}{A_s(\varepsilon^I - \varepsilon^R - \varepsilon^T)}, \quad (2)$$

$$\gamma = \frac{C}{h} \int_0^{t^{imp}} (\varepsilon^I - \varepsilon^R - \varepsilon^T) dt. \quad (3)$$

Формулы (2) и (3) значительно упрощаются при использовании обычно принимаемой гипотезы о равенстве сил  $P_1$  и  $P_2$ . В этом случае  $\varepsilon^I(t) + \varepsilon^R(t) = \varepsilon^T(t)$  и

\* Определяемые таким образом тензорные меры относятся к классу неголономных мер коротационного типа и используются для описания конечных деформаций [19, 20].

в результате получаем соотношения, по форме аналогичные классическим соотношениям метода Кольского для двух импульсов:

$$\tau = E\varepsilon^T \frac{A}{A_s}, \quad (4)$$

$$\gamma = -\frac{2C^{i\text{imp}}}{h} \int_0^t \varepsilon^R dt. \quad (5)$$

В общем случае, когда силы  $P_1$  и  $P_2$  не равны, корректно использовать соотношения второго порядка (2) и (3) (разумеется, только при наличии средств надежного измерения величин деформаций в мерных стержнях) или же использовать приближенную формулу вычисления напряжений по трем импульсам – аналог метода Линдхольма [3]:

$$\tau = E(\varepsilon^I + \varepsilon^R + \varepsilon^T) \frac{A}{2A_s}. \quad (6)$$

## 2. Верификация метода

Верификация метода и проверка состоятельности его основных гипотез проводилась с использованием вычислительного эксперимента на динамический сдвиг на виртуальном стенде, представляющем собой аналог экспериментальной установки НИИ механики МГУ им. М.В. Ломоносова. Расчеты проводились при следующих параметрах виртуальных испытаний.

Мерные стержни и ударник: материал сталь, диаметр 20 мм, длина нагружающего стержня 2 м, опорного 1 м, длины ударника варьировались от 300 до 600 мм, скорость ударника изменялась от 10 до 15 м/с. Измерение деформаций в стержнях производилось на расстоянии 0,5 м от рабочей зоны. Размер рабочей области образца  $2 \times 2 \times 10$  мм ( $h = 2$  мм,  $A_s = 20$  мм). Расчеты проводились в пакете LS-DYNA. Для задания свойств образца использовался модельный упругопластический материал, чувствительный к скорости деформаций, с критерием разрушения, зависящим от вида напряженного состояния. Варьированием параметров модели представлялся широкий класс условий проведения натуральных экспериментов. Характер деформирования и разрушения образца в виртуальном эксперименте показан на рис. 3.

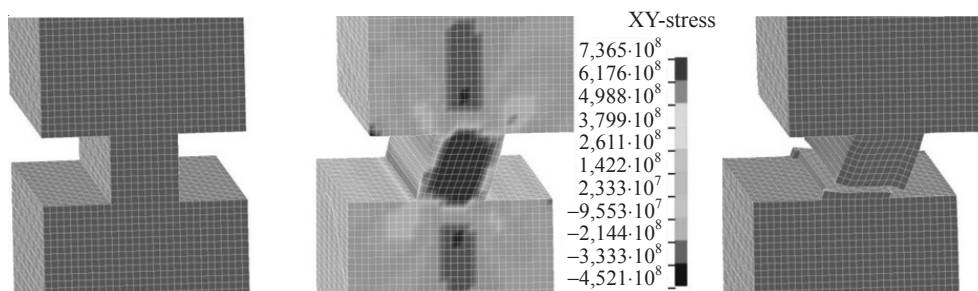


Рис. 3

При исследовании НДС в рабочей зоне (части образца, расположенной между переходниками; на рис. 3 – это средняя часть образца или «шейка» двуглава) выяв-

лены незначительные по величине зоны неоднородности, прилегающие к границам рабочей зоны, в которых наряду со сдвиговыми появляются и растягивающие напряжения (до 30% от сдвиговых напряжений). Однако в силу малости размеров указанных областей это обстоятельство не оказывает существенного влияния на качество построения динамических диаграмм сдвига.

### 3. Анализ результатов расчетов

Проведенные расчеты показали правильность принятых гипотез. На рис. 4 приведен график зависимости сил  $P_1$  и  $P_2$  от времени под действием импульсов деформаций в мерных стержнях (рис. 5), из которого следует справедливость гипотезы о равенстве продольных сил, действующих на образец.

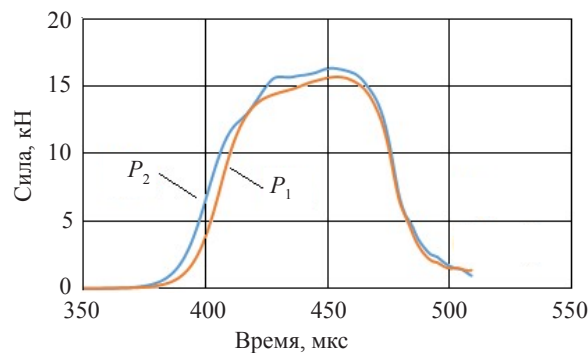


Рис. 4

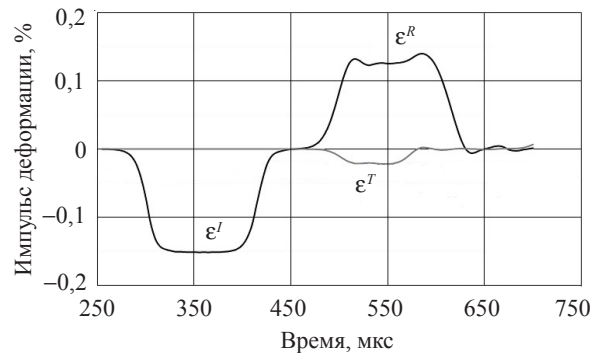


Рис. 5

Получена хорошая точность в реализации плоского деформированного состояния и высокая степень однородности сдвиговых напряжений и деформаций в рабочей зоне образца вплоть до разрушения. Зависимости параметра вида напряженного состояния ( $p/\sigma$ ) и параметра Лоде, измеренных на поверхности плоскости среза, показали, что сдвиговый характер деформирования превалирует в образце вплоть до разрушения (рис. 6).

Сравнение деформационных диаграмм  $\sigma_i(\epsilon_i)$  ( $\sigma_i = \tau\sqrt{3}$ ,  $\epsilon_i = \gamma/\sqrt{3}$ ), а также скоростей интенсивностей деформаций, построенных с использованием предложенного подхода (в двух вариантах) с их расчетными величинами (рис. 7 и рис. 8), показывает их хорошую согласованность. При этом расчетная диаграмма лежит несколько выше диаграмм, построенных по методике (при равных  $P_1$  и  $P_2$ ).

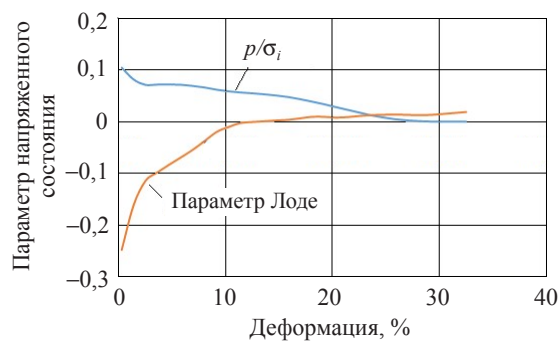


Рис. 6

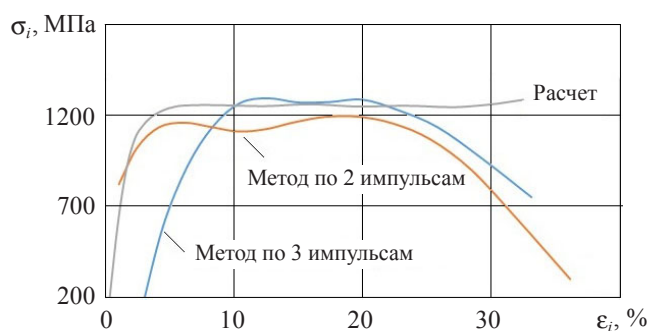


Рис. 7

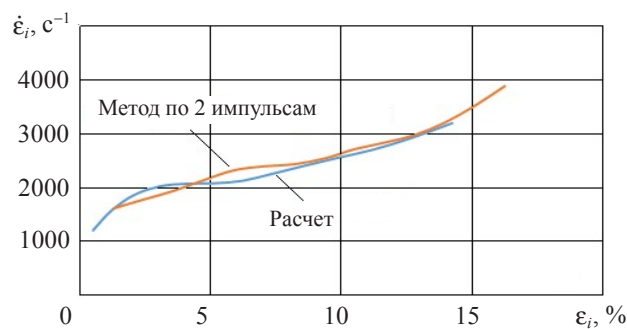


Рис. 8

### Заключение

Предложена и обоснована расчетами новая модификация метода Кольского с РСГ для проведения высокоскоростных динамических испытаний на динамический сдвиг. Показано, что рассмотренная испытательная схема позволяет реализовать в рабочей части образца из испытуемого материала сдвиговое напряженно-деформированное состояние вплоть до разрушения и может быть эффективно применена для исследований определяющих соотношений и критериев разрушения широкого класса материалов, включая высокопрочные металлы и сплавы. Получены общие соотношения, связывающие между собой сдвиговые напряжения и деформации и переходящие при равенстве продольных сил, действующих на образец, в форму, аналогичную соотношениям классического метода Кольского.

#### Список литературы

1. Кольский Г. Исследование механических свойств материалов при больших скоростях нагружения. *Механика*. 1950. Вып. 4. С. 108–119.
2. Kolsky H. An investigation of the mechanical properties of material at very high rates of loading. *Proceeding of the Physical Society. Section B*. 1949. Vol. 62. Iss. 11. P. 676–700.
3. Lindholm U.S. Some experiments with the split Hopkinson pressure bar. *Journal of the Mechanics and Physics of Solids*. 1964. Vol. 12. P. 317–335.
4. Lindholm U.S., Yeakley L.M. High strain-rate testing: tension and compression. *Experimental Mechanics*. 1968. Vol. 8. No 1. P. 1–9.
5. Nicholas T. Tensile testing of materials at high rates of strain. *Experimental Mechanics*. 1981. Vol. 21. No 5. P. 177–195.
6. Bragov A.M., Lomunov A.K. Methodological aspects of studying dynamic material properties using the Kolsky method. *International Journal of Impact Engineering*. 1995. Vol. 16. P. 321–330. DOI: 10.1016/0734-743X(95)93939-G.
7. Chen W., Song B. *Split Hopkinson (Kolsky) Bar*. New York–Dordrecht–Heidelberg–London: Springer, 2011. 388 p.
8. Bragov A.M., Igumnov L.A., Konstantinov A. Yu., Lomunov A.K., Litvinchuk S. Yu. Use of Hopkinson method and its modifications in the USSR and Russia. *Proceedings of Hopkinson Centenary Conference*. Cambridge. 2014. P. 69–100.
9. Ogawa K. Impact-tension compression test by using a split Hopkinson bar. *Experimental Mechanics*. 1984. Vol. 24. No 2. P. 81–85.
10. Bragov A.M., Demenko P.V., Lomunov A.K., Sergeichev I.V., Kruszka L. Investigation of behavior of materials of different physical nature using the Kolsky method and its modifications. *New Experimental Methods in Material Dynamics and Impact. Trends in Mechanics of Materials*. Eds. W.K. Nowacki, J.R. Klepaczko. Warsaw. 2001. Vol. 3. P. 337–348.
11. Klepaczko J. Application of the split Hopkinson pressure bar to fracture dynamics. *Mechanical Properties at High Rates of Strain*. 1979. P. 201–214.
12. Hosur M.V., Waliul Islam S.M., Vaidya U.K., Kumar A., Dutta P.K., Jeelani S. Dynamic punch shear characterization of plain weave graphite/epoxy composites at room and elevated temperatures. *Composite Structures*. 2005. Vol. 70. Iss. 3. P. 295–307.
13. Bragov A.M., Lomunov A.K., Konstantinov A. Yu., Lamzin D.A. Modified Kolsky method for determining the shear strength of brittle materials. *Technical Physics Letters*. 2017. Vol. 43. P. 130–132. DOI:10.1134/S1063785017010175.
14. Ren L., Gama B.A., Gillespie J.W. Jr., Yen C.-F. *Dynamic Punch Shear Behavior of Unidirectional and Plain Weave S-2 Glass/SC15 Composites*. Report No (s): AD-A422660, ARL-CR-535. March 2004. 36 p.
15. Nemat-Nasser S., Isaacs J.B., Liu M. Microstructure of high-strain, high-strain-rate deformed tantalum. *Acta Materialia*. 1998. Vol. 46. Iss. 4. P. 1307–1325.
16. Duffy J., Campbell J.D., Hawley R.H. On the use of a torsional split Hopkinson bar to study rate effects in 1100-0 aluminum. *Trans. ASME: J. Appl. Mech.* 1972. Vol. 37. P. 83–91.
17. Gilat A. Torsional Kolsky bar testing. *ASM Handbook. ASM International*. 2000. Vol. 8. P. 505–515.
18. Zhao P.D., Lu F.Y., Lin Y.L., Chen R., Lu L. Dynamic shear response of a polymer bonded explosive using a modified Hopkinson bar apparatus. *Conference Proceedings of the Society for Experimental Mechanics*. Series 6. 2011. P. 223–228. DOI: 10.1007/978-1-4614-0222-0\_28.
19. Mossakovsky P.A., Antonov F.K., Kostyreva L.A. Investigation of failure criterion in dynamic torsion tests with solid cylindrical specimens. *Proceedings of the 8<sup>th</sup> European LS-DYNA Users Conference*. Strasbourg. May 2011.
20. Ильюшин А.А. *Механика сплошных сред*. М.: Изд-во МГУ, 1990. 310 с.

#### References

1. Kolsky G. Issledovanie mekhanicheskikh svoystv materialov pri bolshikh skorostyakh nagruzeniya [Mechanical properties of materials under high loading rates]. *Mekhanika [Mechanics]*. 1950. No 4. P. 108–119 (In Russian).

2. Kolsky H. An investigation of the mechanical properties of material at very high rates of loading. *Proceeding of the Physical Society. Section B*. 1949. Vol. 62. Iss. 11. P. 676–700.
3. Lindholm U.S. Some experiments with the split Hopkinson pressure bar. *Journal of the Mechanics and Physics of Solids*. 1964. Vol. 12. P. 317–335.
4. Lindholm U.S., Yeakley L.M. High strain-rate testing: tension and compression. *Experimental Mechanics*. 1968. Vol. 8. No 1. P. 1–9.
5. Nicholas T. Tensile testing of materials at high rates of strain. *Experimental Mechanics*. 1981. Vol. 21. No 5. P. 177–195.
6. Bragov A.M., Lomunov A.K. Methodological aspects of studying dynamic material properties using the Kolsky method. *International Journal of Impact Engineering*. 1995. Vol. 16. P. 321–330. DOI: 10.1016/0734-743X(95)93939-G.
7. Chen W., Song B. *Split Hopkinson (Kolsky) Bar*. New York–Dordrecht–Heidelberg–London. Springer. 2011. 388 p.
8. Bragov A.M., Igunnov L.A., Konstantinov A. Yu., Lomunov A.K., Litvinchuk S. Yu. Use of Hopkinson method and its modifications in the USSR and Russia. *Proceedings of Hopkinson Centenary Conference*. Cambridge. 2014. P. 69–100.
9. Ogawa K. Impact-tension compression test by using a split Hopkinson bar. *Experimental Mechanics*. 1984. Vol. 24. No 2. P. 81–85.
10. Bragov A.M., Demenko P.V., Lomunov A.K., Sergeichev I.V., Kruszka L. Investigation of behavior of materials of different physical nature using the Kolsky method and its modifications. *New Experimental Methods in Material Dynamics and Impact. Trends in Mechanics of Materials*. Eds. W.K. Nowacki, J.R. Klepaczko. Warsaw. 2001. Vol. 3. P. 337–348.
11. Klepaczko J. Application of the split Hopkinson pressure bar to fracture dynamics. *Mechanical Properties at High Rates of Strain*. 1979. P. 201–214.
12. Hosur M.V., Waliul Islam S.M., Vaidya U.K., Kumar A., Dutta P.K., Jeelani S. Dynamic punch shear characterization of plain weave graphite/epoxy composites at room and elevated temperatures. *Composite Structures*. 2005. Vol. 70. Iss. 3. P. 295–307.
13. Bragov A.M., Lomunov A.K., Konstantinov A. Yu., Lamzin D.A. Modified Kolsky method for determining the shear strength of brittle materials. *Technical Physics Letters*. 2017. Vol. 43. P. 130–132. DOI:10.1134/S1063785017010175.
14. Ren L., Gama B.A., Gillespie J.W. Jr., Yen C.-F. *Dynamic Punch Shear Behavior of Unidirectional and Plain Weave S-2 Glass/SC15 Composites*. Report No (s): AD-A422660, ARL-CR-535. March 2004. 36 p.
15. Nemat-Nasser S., Isaacs J.B., Liu M. Microstructure of high-strain, high-strain-rate deformed tantalum. *Acta Materialia*. 1998. Vol. 46. Iss. 4. P. 1307–1325.
16. Duffy J., Campbell J.D., Hawley R.H. On the use of a torsional split Hopkinson bar to study rate effects in 1100-0 aluminum. *Trans. ASME: J. Appl. Mech.* 1972. Vol. 37. P. 83–91.
17. Gilat A. Torsional Kolsky bar testing. *ASM Handbook. ASM International*. 2000. Vol. 8. P. 505–515.
18. Zhao P.D., Lu F.Y., Lin Y.L., Chen R., Lu L. Dynamic shear response of a polymer bonded explosive using a modified Hopkinson bar apparatus. *Conference Proceedings of the Society for Experimental Mechanics. Series 6*. 2011. P. 223–228. DOI: 10.1007/978-1-4614-0222-0\_28.
19. Mossakovsky P.A., Antonov F.K., Kostyreva L.A. Investigation of failure criterion in dynamic torsion tests with solid cylindrical specimens. *Proceedings of the 8<sup>th</sup> European LS-DYNA Users Conference*. Strasbourg. May 2011.
20. Ilyushin A.A. *Mekhanika sploshnykh sred [Mechanics of Continuum Media]*. Moscow. MGU Publ. 1990. 310 p. (In Russian).



**ON A NEW METHOD OF EXPERIMENTAL STUDIES OF MATERIALS  
ON A DYNAMIC SHIFT IN HIGH SPEED DEFORMATION**

**Mossakovsky P.A.<sup>1</sup>, Kostyreva L.A.<sup>1,2</sup>**

<sup>1</sup>*Institute of Mechanics Lomonosov Moscow State University, Moscow, Russian Federation*

<sup>2</sup>*JSC "Gas-Turbine Engineering RPC "Salut", Moscow, Russian Federation*

A new modification of the Kolsky's method based on the classical compression test scheme is proposed and mathematically justified, allowing one to investigate the dynamic processes of simple and pure shear up to failure for a wide class of materials, including high-strength metals and alloys. It is shown that the considered test scheme makes it possible to realize in the working part of the sample from the test material a near-homogeneous shear stress-strain state and can be effectively used to study the constitutive equation and criteria of the destruction of materials. General relations connecting shear stresses and strains are obtained and when the longitudinal forces acting on the sample are equal, they obtain a form analogous to the relations of the classical Kolsky's method.

*Keywords:* split Hopkinson bar (SHB), Kolsky method, dynamic material properties, destruction, simple shear, pure shear.