

**СПОСОБ ИССЛЕДОВАНИЯ БОЛЬШИХ ПЛАСТИЧЕСКИХ ДЕФОРМАЦИЙ****В.М. Ярославцев**

mt13@bmstu.ru

**Н.А. Ярославцева****МГТУ им. Н.Э. Баумана, Москва, Российская Федерация****Аннотация**

Создание теоретической базы высокоэффективной реализации возможностей метода резания с опережающим пластическим деформированием требует проведения широких исследований, в том числе металлографических. При резании с опережающим пластическим деформированием в зоне обработки используются два механических источника энергии: поверхностное пластическое деформирование и резание. Для изучения деформированного состояния материала широко используют метод координатных делительных сеток. Однако в научной литературе не приведено ни одного экспериментального метода получения картины поля деформации в зоне резания, образованной в результате суммарного воздействия на материал двух последовательных больших пластических деформаций от обработки давлением и непосредственно процесса резания, как это имеет место при резании с опережающим пластическим деформированием. Приведен новый метод нанесения микросеток, который позволил воспроизвести реальные картины деформаций, происходящих в зоне стружкообразования при резании с опережающим пластическим деформированием в условиях реальных режимов обработки, углов заточки режущего инструмента и использования в экспериментах труднообрабатываемых материалов

**Ключевые слова**

*Координатные делительные микросетки, обработка резанием, стружкообразование, метод исследования пластических деформаций, резание с опережающим пластическим деформированием*

Поступила в редакцию 22.03.2016

© МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2016

Одним из направлений улучшения обрабатываемости материалов резанием, предложенным и развитым в МГТУ им. Н.Э. Баумана, является управление условиями пластического деформирования материала непосредственно в зоне обработки при стружкообразовании [1, 2]. Это положение явилось теоретической предпосылкой при разработке метода резания с опережающим пластическим деформированием (ОПД) [3, 4], при котором режущим инструментом с поверхности заготовки удаляется предварительно деформированный, упрочненный материал. Для деформационного упрочнения обрабатываемого материала применяют различные методы и схемы поверхностного пластического деформиро-

вания (ППД) [5–9 и др.]. Промышленное использование показало высокую эффективность метода резания с ОПД по таким технологическим и технико-экономическим показателям, как точность обработки, качество поверхностного слоя, производительность, период стойкости режущего инструмента, возможность устойчивого стружкодробления.

Для реализации технологических возможностей процесса резания с ОПД необходимо располагать базой знаний о закономерностях протекания процесса пластического деформирования материала в зоне стружкообразования на микроуровне, имеющих место в результате последовательного энергетического воздействия методами ППД и обработки резанием, разнородными по физико-химическому механизму. Большой практический и научный интерес представляют результаты исследования их совместного действия.

Методы экспериментального определения деформированного состояния и количественной оценки степени деформации материала непосредственно связаны с измерением в процессе нагружения или после него линейных перемещений отдельных, выделенных в изучаемой области точек твердого тела. Широко распространенным способом опытного определения деформированного состояния материала, позволяющим получать наиболее полную информацию о процессе как при обработке давлением, так и при резании служит метод делительных сеток [10–12 и др.], основанный на измерении относительных смещений отдельных характерных элементов сетки, нанесенной на поверхность исследуемой области. В этом случае на первом этапе из обрабатываемого материала изготавливают шлиф, затем на полированную поверхность образца с определенным шагом наносят делительную сетку. Подготовленный образец подвергают энергетическому воздействию соответствующего метода или вида обработки.

Для нанесения делительной сетки на металлические поверхности используют такие способы, как кернение или нацарапывание системы взаимно перпендикулярных рисок или концентрических окружностей, метод фотосетки, метод накачивания сеток типографскими красками, методы травления и напыления. Каждый приведенный метод нанесения сеток имеет свои специфические особенности. Например, нанесение делительных сеток вдавливанием в поверхность образца конического индентора, в частности корундовой иглы, требует подбора иглы, обеспечивающей получение на изучаемой поверхности отпечатков, имеющих вид правильной окружности [10]. Последнее вызывает необходимость использовать для исследований материал с однородной структурой. При нанесении делительных сеток нацарапыванием специальным приспособлением на инструментальном микроскопе, где в качестве режущего инструмента используются ножи из быстрорежущей стали или твердого сплава [10], погрешность формы нацарапанной сетки вносится самой технологией ее нанесения, при которой используется дополнительное механическое приспособление, что приводит к снижению точности результатов исследований. При напылении делительных сеток их четкость определяется качеством копируемой сетки.

Опыт применения разных методов нанесения координатных делительных сеток показал, что при высоких степенях деформации исследуемого материала, которыми отличается, в частности, технологический метод обработки резанием [13, 14], конечные искажения координатной сетки становятся неразличимыми в текстуре материала. Поэтому в этих случаях деформации исследуют в условиях, существенно отличающихся от реальных. Так, при изучении деформированного состояния зоны резания с помощью делительных сеток образцы обрабатывают либо на микроскоростях, либо с применением инструмента с завышенным передним углом  $\gamma = 30 \dots 45^\circ$ .

Воспроизведение реальной картины деформаций, происходящих в зоне обработки при резании с ОПД, стало возможным благодаря разработанному в МГТУ им. Н.Э. Баумана методу координатных микросеток [15], в основе которого лежит принцип усиления контрастности изображения микросеток на фоне деформированного металла.

Новый способ исследования больших пластических деформаций создавался для получения наглядной картины поля деформации в зоне резания в результате последовательного воздействия на материал двух разнохарактерных технологических методов: ППД и резания при реальных, нормативных условиях обработки.

Решить такую задачу удалось в результате разработки и использования нетрадиционной технологии нанесения координатных делительных микросеток, что позволило обеспечить ряд необходимых специфических требований для исследования процесса стружкообразования при резании с ОПД, прежде всего требования сохранности изображения сеток в микрообластях при последовательном осуществлении двух больших пластических деформаций. Тем самым дана возможность наблюдать за изменением положения их реперных точек сначала в результате воздействия упрочняющего устройства, а затем воздействия режущего инструмента на материал.

Достоинством применяемой технологии является также отсутствие требований к исходной однородности структуры исследуемого материала, поскольку при резании с ОПД, как и при обычном резании, обрабатываемый материал характеризуется неоднородностью свойств по толщине срезаемого слоя [16] и, следовательно, его структуры. Кроме того, новый способ нанесения микросеток позволяет обеспечить их малую базу (размер стороны квадрата 0,05...0,07 мм и менее). Это особенно важно при чистовой обработке, когда процесс резания проводится с малыми толщинами среза.

Желаемый результат при исследовании двух последовательных больших пластических деформаций достигнут при использовании в технологии нанесения микросеток комбинации методов нацарапывания и кернения в сочетании с отдельными элементами такого метода неразрушающего контроля, как люминесцентная дефектоскопия.

Получение картины деформированного состояния материала при механической обработке с применением нового метода нанесения координатных делительных микросеток состоит из нескольких этапов.

1. Полирование поверхностей образцов из исследуемых материалов для нанесения микросеток.

2. Разметка способом нацарапывания координатной делительной микросетки на полированной поверхности образцов под микроскопом при большом увеличении.

3. Нанесение углублений в узлах ячеек нацарапанной сетки под микроскопом при большом увеличении с помощью индентора микротвердомера ПМТ-3 (кернение).

4. Заполнение углублений люминесцентной жидкостью.

5. Получение корней стружек с помощью приспособления для мгновенного фиксирования процесса резания.

Для полирования поверхности образцы из исследуемого материала помещали в металлические кольца и заливали стиракрилом. Шлифование выполняли карборундовой шлифовальной шкуркой на бумажной основе с постепенным переходом от бумаги 329-микро к микронной бумаге № 28, № 20 и № 14 (в указанной последовательности). При переходе от одного номера зернистости к другому шлифуемую поверхность образца очищали от абразива, а направление обработки меняли на 90°. После окончательного шлифования образцы тщательно очищали, обезжиривали и полировали пастой на основе оксида хрома до исчезновения видимых рисок.

На полированную поверхность образцов, используя микротвердомер ПМТ-3, под микроскопом при большом увеличении ( $\times 487$ ) наносили координатные делительные микросетки. Сначала с помощью алмазной пирамидки под нагрузкой один грамм нацарапывали микросетку с шагом 0,06 мм. Затем дополнительно в узлах ячеек нацарапанной сетки той же пирамидкой под большой нагрузкой накернивали отпечатки (как это имеет место при измерении микротвердости) — реперные точки, которые в дальнейшем служили базовыми элементами при исследованиях изменений деформированного состояния материала в зоне резания. Как показали эксперименты, оптимальной нагрузкой, при которой получается достаточная глубина отпечатка (чтобы сохранить картину искаженной сетки в стружке после двух больших пластических деформаций), является нагрузка, равная 200 г. Отпечатки от меньших нагрузок становятся неразличимыми в текстуре стружки.

После нацарапывания микросетки и кернения в узлах углублений их заполняли люминесцентной жидкостью, что усиливало контрастность изображения отпечатков при конечной степени деформации обрабатываемого материала в условиях резания с ОПД, сделав их четко различимыми на фоне текстуры стружки. Это позволяет анализировать и оценивать количественно деформационные процессы в зоне стружкообразования.

Приведенные микрофотографии корней стружек (рисунок) выполнены на металлографическом горизонтальном микроскопе МИМ-8М в затемненном помещении при облучении ультрафиолетовыми лучами, действие которых вызывает свечение (флюоресценцию) люминесцентного вещества, входящего в

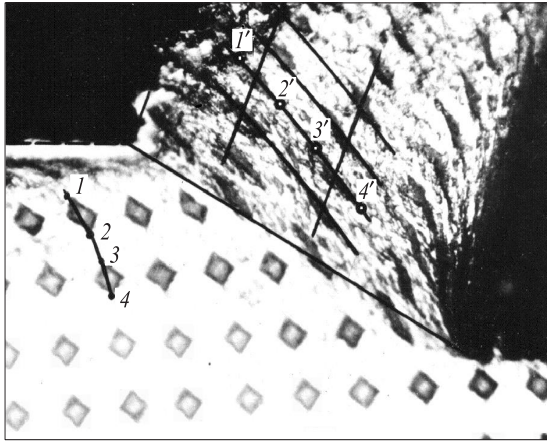
состав жидкости. Для получения деформируемой области в зоне обработки использовали специальное приспособление для мгновенного останова процесса резания (конструкция разработана в МГТУ им. Н.Э. Баумана).

На рисунке цифрами 1, 2, 3, 4, 5 обозначены положения вершин отпечатков, представляющих собой узлы делительной микросетки после обработки образца ППД накатным роликом; цифрами 1', 2', 3', 4', 5' обозначены положения этих же вершин отпечатков в стружке после прохождения ими условной плоскости сдвига, расположенной в переходной пластически деформируемой области в зоне резания, т. е. после воздействия второй большой пластической деформации при резании.

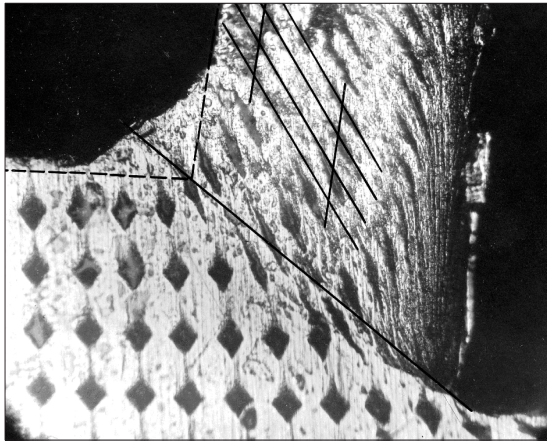
На микрофотографиях видно, что выделенные в срезаемом слое микрообъемы материала, имеющие первоначально в плоскости микрошлифа форму квадрата (см. рисунок, б) или параллелограмма (в результате предварительной пластической деформации срезаемого слоя) (см. рисунок, а и в), подвергаются в переходной пластически деформируемой зоне интенсивному сдвигу и совместным сжатию и растяжению. В результате они принимают форму сильно вытянутых параллелограммов с несколько искривленными сторонами (см. рисунок, в). Параллелограммы в стружке по площади равновелики геометрическим фигурам, выделенным в срезаемом слое, и равны между собой.

Разработанный метод микросеток позволил установить деформированное состояние в зоне стружкообразования в условиях реальных режимов обработки с ОПД и углов заточки режущего инструмента, а также в условиях использования при проведении экспериментальных исследований труднообрабатываемых материалов (12Х18Н10Т, 40ХСШ, ХН77ТЮР и др.), относящихся к разным группам по обрабатываемости резанием. Кроме того, предложенный метод координатных микросеток, обеспечивая возможность нанесения сетки с шагом 0,06...0,05 мм и менее, позволяет исследовать зоны стружкообразования в случаях, когда толщина срезаемого слоя металла составляет десятые и даже сотые доли миллиметра. Он также способен фиксировать в зоне резания смещение обрабатываемого материала в процессе его пластического течения и разрушения на разных по расположению микроучастках, которыми могут служить различные уровни по толщине срезаемого слоя, по толщине стружки, разные точки, находящиеся в переходной пластически деформируемой зоне и зоне разрушения. Большое увеличение ( $\times 487$ ), при котором наносятся сетки, обеспечивает высокую точность их геометрии, что представляет собой гарантию достоверности и точности полученных результатов.

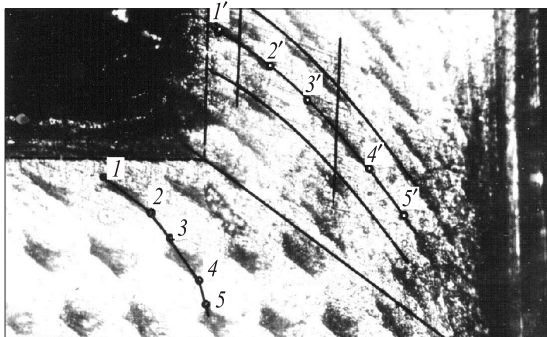
Таким образом, предложенный комбинированный способ нанесения координатных делительных микросеток позволил воспроизвести реальную картину деформаций, происходящих в зоне резания с ОПД, и математически описать напряженно-деформированное состояние материала на разных стадиях процесса стружкообразования [16]. Кроме того, с помощью метода микросеток стало возможным уточнить величину зоны стружкообразования и рассчитать время



*a*



*б*



*в*

Деформированное состояние прямоугольной делительной сетки в корнях стружек ( $\times 487$ ) при нормативных условиях резания ( $v = 0,29$  м/с;  $a = 0,2$  мм;  $b = 3$  мм):  
*a* — сталь 40ХСШ (ППД-резание); *б, в* — сталь 12Х18Н9Т (резание и ППД-резание)

протекания деформационных процессов, а также время перехода исходного материала заготовки в материал стружки ( $10^{-4} \dots 10^{-7}$  с) [14].

## ЛИТЕРАТУРА

1. Подураев В.Н., Ярославцев В.М., Ярославцева Н.А. Способ обработки резанием с опережающим пластическим деформированием // Вестник машиностроения. 1971. № 4. С. 64–65.
2. Ярославцев В.М. Разработка методологии поиска новых методов обработки и ее практическая реализация // Вестник МГТУ им. Н.Э. Баумана. Сер. Машиностроение. 2007. № 2 (67). С. 56–70.
3. А.с. № 358089 (СССР). Способ обработки резанием // В.М. Ярославцев, Н.А. Ярославцева, В.Н. Подураев. Опубл. в Б.И. 1972. № 34.
4. А.с. № 407648 (СССР). Ярославцев В.М. Способ обработки резанием с опережающим пластическим деформированием. Опубл. в Б.И. 1974. № 47.
5. Ярославцев В.М. Резание с опережающим пластическим деформированием. М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2010. 46 с.
6. Sato Mototaro, Kato Yoshio, Tsutiya Kasuhiro. On the cutting mechanism of cold-rolled aluminum alloy // J. Jap. Inst. Light Metals. 1978. Vol. 28. No. 2. P. 93–97.
7. Abeiyama Shozo, Kumura Atsuyoshi, Nakamura Sadayuki. Influence of cold working on machinability // Denki-Selko, Elec. Funace Steel. 1980. Vol. 51. No. 3. P. 188–194.
8. Патент РФ № 151913 U1, МПК В23С 5/06 (2006.01). Сборная торцовая фреза для обработки металлов с опережающим пластическим деформированием. Ярославцев В.М., Ярославцева Н.А., Назаров Н.Г. Заявл. 30.12.2014; опубл. 20.04.2015.
9. Влияние угла наклона воздействующих поверхностей деформирующего элемента на характеристики методов комбинированного прошивания (протягивания) отверстий / Е.С. Сергеев, М.А. Зинин, С.А. Гаврилов, А.В. Щедрин, В.И. Воронков, А.О. Поляков // Упрочняющие технологии и покрытия. 2015. № 3 (123). С. 20–24.
10. Гольдшмидт М.Г. Деформации и напряжения при резании металлов. Томск: STT, 2001. 180 с.
11. Каргин В.Р., Каргин Б.В. Экспериментальное исследование процессов деформации при обработке давлением. Самара: Изд-во Самарского ГАУ, 2010. 49 с.
12. Ярославцева Н.А. Исследование вида деформации в зоне стружкообразования при резании с опережающим пластическим деформированием // Вестник МГТУ им. Н.Э. Баумана. Сер. Машиностроение. 2012. № 3. С. 101–113.
13. Рехт Р.Ф. Разрушающий термопластический сдвиг // Труды амер. общ-ва инж. мех. Сер. Е. Прикладная механика. Т. 31. 1964. № 2. С. 34–39.
14. Ярославцев В.М. Новое о процессе резания // Вестник МГТУ им. Н.Э. Баумана. Сер. Машиностроение. 2000. № 4. С. 32–46.
15. Патент РФ № 2527139 С1, МПК G01N1/30 (2006.01), G01N3/58 (2006.01). Способ экспериментального определения параметров пластической деформации при механической обработке металлов. Ярославцева Н.А., Ярославцев В.М., Назаров Н.Г. Заявл. 28.02.2013; опубл. 27.08.2014.
16. Ярославцев В.М. Механика процесса резания пластически деформированных металлов с неоднородными свойствами по толщине срезаемого слоя // Наука и образование. МГТУ им. Н.Э. Баумана. Электрон. журн. 2011. № 8. DOI: 10.7463/0811.0195350 URL: <http://technomag.bmstu.ru/doc/195350.html>

**Ярославцев Виктор Михайлович** — д-р техн. наук, профессор кафедры «Технологии обработки материалов» МГТУ им. Н.Э. Баумана (Российская Федерация, 105005, Москва, ул. 2-я Бауманская, д. 5).

**Ярославцева Нина Александровна** — канд. техн. наук, доцент кафедры «Технологии обработки материалов» МГТУ им. Н.Э. Баумана (Российская Федерация, 105005, Москва, ул. 2-я Бауманская, д. 5).

**Просьба ссылаться на эту статью следующим образом:**

Ярославцев В.М., Ярославцева Н.А. Способ исследования больших пластических деформаций // Вестник МГТУ им. Н.Э. Баумана. Сер. Машиностроение. 2016. № 4. С. 71–80. DOI: 10.18698/0236-3941-2016-4-71-80

**METHOD OF LARGE PLASTIC STRAIN RESEARCH**

**V.M. Yaroslavtsev**

mt13@bmstu.ru

**N.A. Yaroslavtseva**

**Bauman Moscow State Technical University, Moscow, Russian Federation**

**Abstract**

Creating a theoretical framework for high-performance implementations of capabilities of the cutting method with outstripping plastic deformation (OPD), first proposed and developed in Bauman Moscow State Technical University, requires extensive research, including metallographic research. In the treatment area cutting with OPD uses two mechanical sources of energy: methods of surface plastic strain and cutting. To study the strain state of the material, method of coordinate dividing grids is widely used. However, the scientific literature does not describe a single experimental method of obtaining a deformation field pattern in the cutting area, which results from the total impact on the material of two consecutive large plastic strains — from pressure treatment and the process of cutting, as when cutting with OPD. We show a new method of applying micro-grids, which allows us to solve the task of recreating a real pattern of deformation occurring in the zone of chip formation when cutting with OPD under the actual operating conditions, the angles of sharpening the cutting tool and the use of intractable materials

**Keywords**

*Coordinate dividing micro-grids, machining, chip formation, method of plastic deformation research, cutting with outstripping plastic deformation*

**REFERENCES**

- [1] Poduraev V.N., Yaroslavtsev V.M., Yaroslavtseva N.A. A method of machining with leading plastic deformation. *Vestnik mashinostroeniya* [Bulletin of mechanical engineering], 1971, no. 4, pp. 64–65 (in Russ.).
- [2] Yaroslavtsev V.M. Development and practical implementation of methodology of search of new methods of material processing. *Vestn. Mosk. Gos. Tekh. Univ. im. N.E. Baumana, Mashinost.* [Herald of the Bauman Moscow State Tech. Univ., Mech. Eng.], 2007, no. 2, pp. 56–70 (in Russ.).
- [3] Yaroslavtseva N.A., Yaroslavtsev V.M., Poduraev V.N. Sposob obrabotki rezaniem [Method of processing by cutting]. Inventor's Certificate USSR, no. 358089, 1972.



- [4] Yaroslavtsev V.M. Sposob obrabotki rezaniem s operezhayushchim plasticheskim deformirovaniem [Method of processing by cutting with leading plastic deforming]. Inventor's Certificate USSR no. 407648, 1974.
- [5] Yaroslavtsev V.M. Rezanie s operezhayushchim plasticheskim deformirovaniem [Cutting with leading plastic deforming]. Moscow, MGTU im. N.E. Baumana Publ., 2010. 46 p.
- [6] Sato Mototaro, Kato Yoshio, Tsutiya Kasuhiro. On the cutting mechanism of cold-rolled aluminum alloy. *J. Jap. Inst. Light Metals*, 1978, vol. 28, no. 2, pp. 93–97.
- [7] Abeyama Shozo, Kumura Atsuyoshi, Nakamura Sadayuki. Influence of cold working on machinability. *Denki-Selko, Elec. Furnace Steel*, 1980, vol. 51, no. 3, pp. 188–194.
- [8] Yaroslavtsev V.M., Yaroslavtseva N.A., Nazarov N.G. Sbornaya tortsovaya freza dlya obrabotki metallov s operezhayushchim plasticheskim deformirovaniem [Interlocking face mill for metal working with leading plastic deformation]. Patent RF no. 151913 U1, MPK V23S 5/06. 01.2006.
- [9] Sergeev E.S., Zinin M.A., Gavrilov S.A., Shchedrin A.V., Voronkov V.I., Polyakov A.O. Influence of the angle of deflection member surfaces affect the performance of the combined methods of suturing (drawing) of the holes. *Uprochnyayushchie tekhnologii i pokrytiya* [Strengthening Technologies and Coatings], 2015, no. 3, pp. 20–24 (in Russ.).
- [10] Gol'dshmidt M.G. Deformatsii i napryazheniya pri rezanii metallov [Deformations and stresses in metal cutting]. Tomsk, STT, 2001. 180 p.
- [11] Kargin V.R., Kargin B.V. Eksperimental'noe issledovanie protsessov deformatsii pri obrabotke davleniem [Experimental study of deformation processes in pressure treatment]. Samara, Samarskiy GAU Publ., 2010. 49 p.
- [12] Yaroslavtseva N.A. Study of deformation type in the area of chip formation in case of cutting with leading plastic deforming. *Vestn. Mosk. Gos. Tekh. Univ. im. N.E. Baumana, Mashinost.* [Herald of the Bauman Moscow State Tech. Univ., Mech. Eng.], 2012, no. 3, pp. 101–113 (in Russ.).
- [13] Recht R.F. Catastrophic thermoplastic shear. *J. Appl. Mech.*, 1964, vol. 31, iss. 2, pp. 189–193. DOI:10.1115/1.3629585.
- [14] Yaroslavtsev V.M. New in cutting process. *Vestn. Mosk. Gos. Tekh. Univ. im. N.E. Baumana, Mashinost.* [Herald of the Bauman Moscow State Tech. Univ., Mech. Eng.], 2000, no. 4, pp. 32–46 (in Russ.).
- [15] Yaroslavtseva N.A., Yaroslavtsev V.M., Nazarov N.G. Sposob eksperimental'nogo opredeleniya parametrov plasticheskoy deformatsii pri mekhanicheskoy obrabotke metallov [The method of experimental determining plastic deformation parameters during metal machining]. Patent RF no. 2527139 S1, MPK G01N1/30. 01. 2006, G01N3/58. 0.12006.
- [16] Yaroslavtsev V.M. Mechanics of cutting processes of plastically deformed metals with non-uniform properties of cutting layer. *Nauka i obrazovanie. MGTU im. N.E. Baumana* [Science & Education of the Bauman MSTU. Electronic Journal], 2011, no. 8. DOI: 10.7463/0811.0195350 Available at: <http://technomag.bmstu.ru/en/doc/195350.html>

**Yaroslavtsev V.M.** — Dr. Sci. (Eng.), Professor of Material Processing Technologies Department, Bauman Moscow State Technical University (2-ya Baumanskaya ul. 5, Moscow, 105005 Russian Federation).

**Yaroslavtseva N.A.** — Cand. Sci. (Eng.), Assoc. Professor of Material Processing Technologies Department, Bauman Moscow State Technical University (2-ya Baumanskaya ul. 5, Moscow, 105005 Russian Federation).

**Please cite this article in English as:**

Yaroslavtsev V.M., Yaroslavtseva N.A. Method of Large Plastic Strain Research. *Vestn. Mosk. Gos. Tekh. Univ. im. N.E. Baumana, Mashinostr.* [Herald of the Bauman Moscow State Tech. Univ., Mech. Eng.], 2016, no. 4, pp. 71–80. DOI: 10.18698/0236-3941-2016-4-71-80