

# ТЕХНОЛОГИЯ И ОБОРУДОВАНИЕ МЕХАНИЧЕСКОЙ И ФИЗИКО-ТЕХНИЧЕСКОЙ ОБРАБОТКИ

УДК 621.941.012:621.787.4

## ЭФФЕКТИВНОСТЬ МЕТОДОВ ОПЕРЕЖАЮЩЕГО ДЕФОРМАЦИОННОГО УПРОЧНЕНИЯ МАТЕРИАЛА СРЕЗАЕМОГО СЛОЯ ПРИ ОБРАБОТКЕ РЕЗАНИЕМ

**В.М. Ярославцев**

МГТУ им. Н.Э. Баумана, Москва, Российская Федерация  
e-mail: 13@bmstu.ru

*Установлены характерные особенности и общие закономерности воздействия на процесс резания при обработке с опережающим пластическим деформированием методов поверхностного упрочнения, таких как накатывание роликом, ультразвуковая и центробежная обработка, выглаживание, чеканка. Результаты обобщения экспериментальных данных по стойкости режущего инструмента впервые позволили установить интервалы рационального, наиболее эффективного применения исследованных в работе методов поверхностного упрочнения материала в зависимости от толщины срезаемого слоя. Полученные экспериментальные зависимости изменения износостойкости инструмента могут быть использованы для выбора наиболее рационального метода деформационного упрочнения и предварительной оценки ожидаемой эффективности применения резания с опережающим пластическим деформированием.*

**Ключевые слова:** обработка резанием, опережающее пластическое деформирование, методы поверхностного упрочнения, общие закономерности, эффективность, границы применения, выбор метода.

## EFFECTIVENESS OF METHODS FOR LEADING STRAIN HARDENING OF THE MATERIAL OF CUT DOWN LAYER IN MACHINING

**V.M. Yaroslavtsev**

Bauman Moscow State Technical University, Moscow, Russian Federation  
e-mail: 13@bmstu.ru

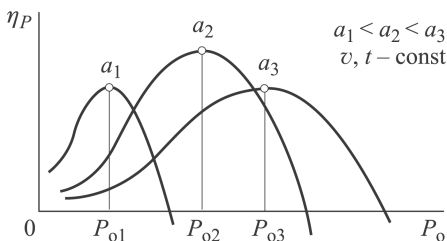
*The authors established the characteristic features and the general regularities of the effect of surface hardening methods on the cutting process in machining them with leading plastic deforming. These methods involve running of roller, ultrasonic and centrifugal processing, smoothing, caulking. For the first time, during the work the results of generalization for experimental data on the firmness of the cutting tool allowed to establish intervals of the rational, the most effective application of the investigated methods for the material surface hardening vs the thickness of the cut down layer. The obtained experimental dependences for a changing wear resistance of the tool can be used to choose the most rational method of strain hardening and the preliminary evaluation for the expected application effectiveness of cutting process with leading plastic deforming.*

**Keywords:** cutting, leading plastic deforming, methods for surface hardening, general regularities, efficiency, application scope, method choice.

Одним из средств повышения эффективности обработки резанием труднообрабатываемых материалов, особенно сталей и сплавов, отличающихся повышенной пластичностью, является разработанный в МГТУ им. Н.Э. Баумана комбинированный метод обработки — резание с опережающим пластическим деформированием (ОПД) [1–3]. В этом случае используют дополнительный источник механической энергии, воздействие которого на срезаемый слой вызывает пластическое деформирование материала, целенаправленно изменяет его физико-механические свойства, улучшает обрабатываемость резанием и, как следствие, повышает период стойкости режущего инструмента и производительность процесса. В качестве такого источника энергии могут служить различные методы поверхностного пластического деформирования (ППД). Однако к настоящему времени как в РФ, так и за рубежом наиболее обстоятельно исследован и нашел промышленное применение метод ОПД преимущественно с использованием накатывания роликом как средства дополнительного механического воздействия на материал срезаемого слоя [3–12].

Экспериментальными исследованиями установлено, что результативность применения метода ОПД зависит от целого ряда факторов, определяющих условия обработки: физико-механических свойств материала заготовки и инструмента, элементов режима обработки (скорости резания  $v$ , подачи  $S$ , глубины резания  $t$ , нагрузки ОПД  $P_0$ ), а также особенностей распределения пластической деформации по толщине срезаемого слоя после механического воздействия устройства ППД, предшествующего процессу удаления материала режущим инструментом.

Исследования показали [11, 12], что значение оптимальной нагрузки  $P_0$  ОПД изменяется в широких пределах и непосредственно связано с толщиной  $a$  срезаемого слоя ( $a = S \sin \varphi$ , где  $\varphi$  — главный угол в плане, рис. 1). При этом наибольшая эффективность метода ОПД для заданных условий обработки достигается при определенном, наиболее благоприятном значении толщины среза  $a_{\text{опт}}$  (рис. 2). Изменения скорости и глубины резания в пределах их нормативных (справочных) значений по режимам обработки не оказывают существенного влияния на оптимальную нагрузку  $P_0$ . Особое значение имеет распределение



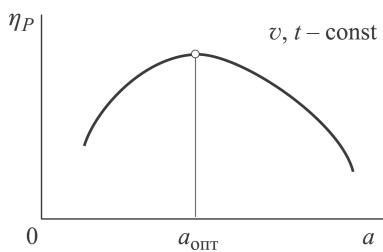
**Рис. 1.** Типовые закономерности относительного изменения силы резания  $\eta_P$  от нагрузки  $P_0$  ОПД при различных толщинах срезаемого слоя  $a$  ( $\eta_P = \frac{P_z - P_{z0}}{P_z} \times 100\%$ ;  $P_z$  — главная составляющая силы резания при обычной обработке;  $P_{z0}$  — главная составляющая силы резания при обработке с ОПД)

пластических деформаций в срезаемом слое, интенсивность и характер которого определяется предварительно применяемым при резании с ОПД методом поверхностного деформационного упрочнения. В связи с этим большой практический интерес представляет исследование эффективности воздействия на процесс резания с ОПД разных способов ППД срезаемого слоя, что позволит обоснованно подходить к выбору наиболее эффективных методов, средств и режимов упрочнения в каждом конкретном случае механической обработки в зависимости от решаемых технологических задач.

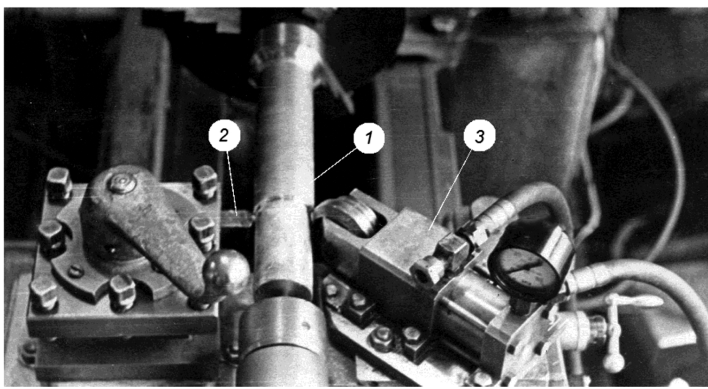
Анализ существующих в настоящее время методов ППД, их конструктивных и технологических особенностей [13–16] показывает, что для задач предварительного деформирования при резании с ОПД наиболее приемлемыми в условиях промышленного производства являются: упрочняющее накатывание роликом, выглаживание, ультразвуковая и центробежная обработки, чеканка. В отдельных случаях могут применяться дорнование, вибронакатывание, вибровыглаживание. Принцип действия или технические характеристики остальных средств ППД ограничивают их применение при обработке резанием, поскольку одни из них не имеют в настоящий момент рациональных для условий резания конструктивных решений, другие – не обеспечивают необходимой интенсивности механического воздействия или скорости преобразования свойств материала, соответствующей скорости резания.

В МГТУ им. Н.Э. Баумана на базе токарно-винторезного станка модели 1К62 были разработаны технологические установки (рис. 3) для обработки резанием с ОПД, использующие накатывание роликом, выглаживание, ультразвуковую и центробежную обработку, чеканку [11, 12, 17–21]. Разработанные установки явились материальной базой для выполнения экспериментальных исследований технологических возможностей и областей эффективного применения обработки резанием с ОПД при разных методах дополнительного воздействия на срезаемый слой.

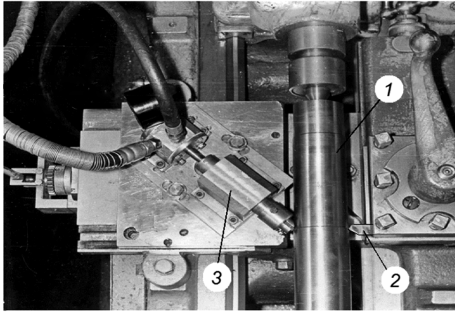
В результате технологических испытаний установлено, что при резании с ОПД изменения основных физических факторов и технологических показателей обработки подчиняются одним и тем же закономерностям (см. рис. 1, 2) независимо от методов и средств дополнительного механического воздействия на материал срезаемого слоя.



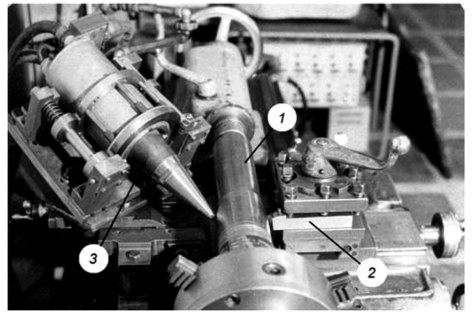
**Рис. 2.** Характерные зависимости относительного изменения силы  $\eta_P$  от толщины срезаемого слоя  $a$



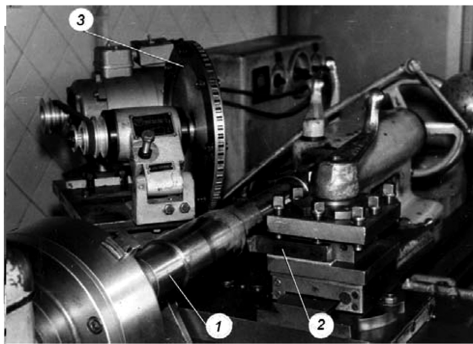
*а*



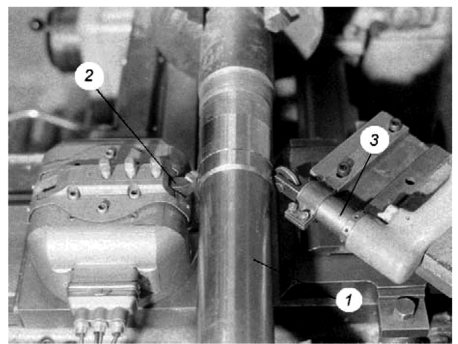
*б*



*в*



*г*



*д*

**Рис. 3. Общий вид технологических установок для точения с ОПД с применением различных методов упрочнения срезаемого слоя:**

*а* — накатывание роликом; *б* — выглаживание; *в* — ультразвуковая обработка; *г* — центробежная обработка; *д* — чеканка; 1 — заготовка; 2 — режущий инструмент; 3 — установка для механического упрочнения срезаемого слоя

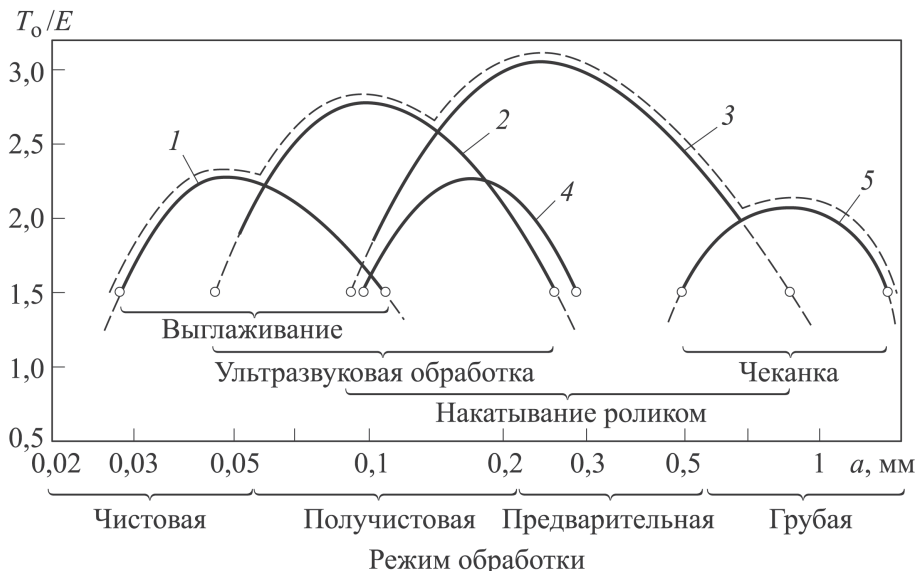
Так, зависимости изменения силовых факторов и температуры резания от значения нагрузки ОПД имеют экстремальный характер. Минимальные значения главной составляющей силы резания  $P_{z0}$  (максимум  $\eta_P$  см. рис. 1, 2) и температуры проявляются практически при одинаковых значениях оптимальной нагрузки  $P_0$  ОПД. Оптимальная нагрузка  $P_0$  обеспечивает наиболее благоприятные условия обработки резанием с ОПД, при которых достигается максимальное повышение периода стойкости инструмента или производительности процесса обработки.

Поэтому во всех случаях, независимо от метода дополнительного воздействия на срезаемый слой, выбор и назначение режима резания с ОПД основывается на определении оптимального значения  $P_0$  для заданных  $v$ ,  $S$  и  $t$ .

В то же время специфика контактного взаимодействия режущего инструмента с поверхностным слоем и особенности распределения деформаций в материале при различных методах упрочнения делают их применение наиболее эффективными в разных интервалах режимов обработки.

На рис. 4 представлены обобщенные зависимости изменения относительной стойкости инструмента  $T_0/T$ , характеризующей эффективность воздействия ОПД, от толщины среза  $a$  при выглаживании, ультразвуковом упрочнении, накатывании роликом, центробежной обработке и чеканке, полученные путем осреднения экспериментальных данных [11, 17–21] для трех существенно отличающихся физико-механическими свойствами материалов (20X13, 12X18H10Т и ХН77ТЮР).

Как видно, применение для предварительного упрочнения материала срезаемого слоя методов выглаживания, ультразвукового упрочнения и чеканки значительно расширяет границы эффективного использования метода резания с ОПД по отношению к упрочнению накатным роликом как в область меньших толщин среза, так и их больших



**Рис. 4.** Обобщенные зависимости изменения относительных стойкостей  $T_0/T$  режущего инструмента от толщины срезаемого слоя  $a$  при резании с ОПД с применением разных методов ППД ( $T_0$  — период стойкости инструмента при резании с ОПД;  $T$  — период стойкости инструмента при обычном резании): 1 — выглаживание; 2 — ультразвуковая обработка; 3 — накатывание роликом; 4 — центробежная обработка; 5 — чеканка

значений. Так, если при накатывании роликом наибольшее повышение стойкости ( $T_0/T \geq 2,5$ ) достигается при  $a \approx 0,14 \dots 0,47$  мм, то в случае ультразвукового воздействия на материал максимальный эффект имеет место в интервале  $a \approx 0,065 \dots 0,15$  мм, а для выглаживания — при  $a \approx 0,035 \dots 0,075$  мм ( $T_0/T \geq 2$ ). Предварительное поверхностное упрочнение срезаемого слоя методом чеканки наиболее эффективно при толщинах среза  $a > 0,7$  мм, при которых относительное повышение периода стойкости инструмента  $T_0/T$  при ОПД превышает соответствующие значения отношения стойкости для других методов ППД. При применении центробежной обработки наиболее высокие показатели повышения стойкости  $T_0/T$  инструмента достигаются при  $a \approx 0,1 \dots 0,3$  мм, однако в этом интервале толщин среза метод уступает эффективности применения для задач ОПД методов ультразвукового упрочнения и накатывания роликом (см. рис. 4).

На рис. 4 штриховой кривой показана огибающая стойкостных зависимостей  $T_0/T = f(a)$ , минимальные значения которой ограничены  $T_0/T = 1,5$ . Как показано на рис. 4, при применении различных методов упрочнения высокая эффективность резания с ОПД реализуется в широком диапазоне толщин срезаемого слоя  $a = 0,03 \dots 1,5$  мм, включающих режимы чистовой, получистовой, предварительной и грубой видов обработок.

Следует подчеркнуть, что выглаживание и ультразвуковое упрочнение как средства ОПД осуществляются при относительно малых статических усилиях деформирования срезаемого материала, значительно меньших, чем в случае накатывания роликом. Например, для выглаживания нагрузка  $P_0$  на заготовку составляет  $\sim 30 \dots 50\%$  нагрузки ОПД в случае накатывания роликом при одинаковых режимах резания. Статическая нагрузка  $q_{ст}$  ультразвукового индентора в  $10-10^2$  раз ниже соответствующих давлений накатного ролика; прикладываемые же к заготовке колебания ультразвуковой частоты практически полностью демпфируются элементами технологической системы.

Высокая эффективность использования методов выглаживания и ультразвукового упрочнения при резании с ОПД с малыми и средними толщинами среза, а также небольшие статические усилия воздействия на заготовку позволяет рекомендовать эти методы для применения на различных операциях механической обработки при изготовлении высокоточных или маложестких деталей.

Графики рис. 4 могут служить основой решения задач предварительного выбора рациональных методов упрочнения срезаемого слоя при резании с ОПД в зависимости от режимов обработки, типа и особенностей конструктивных форм деталей или вида операции механической обработки, а также для ориентировочной оценки ожидаемой эффективности применения метода ОПД.

1. *А.с. № 358089* (СССР). Способ обработки резанием / Ярославцева Н.А., Ярославцев В.М., Подураев В.Н. Оpubл. в БИ, 1972. № 34.
2. *А.с. № 407648* (СССР). Способ обработки резанием с опережающим пластическим деформированием / В.М. Ярославцев. Оpubл. в БИ, 1974. № 47.
3. *Ярославцев В.М.* Резание с опережающим пластическим деформированием: учеб. пособие по курсу “Перспективные технологии реновации”. М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2010. 46 с.
4. *Полянчиков Ю.Н., Крайнев Д.В., Норченко П.А., Ингеманссон А.Р.* Улучшение параметров шероховатости при обработке резанием с опережающим пластическим деформированием // Вестник Саратовского ГТУ. 2010. № 1. С. 67–71.
5. *Норченко П.А.* Повышение эффективности процесса резания нержавеющей сталей аустенитного класса с опережающим пластическим деформированием. Дисс... канд. техн. наук. Волгоград: ВолгГТУ, 2010. 127 с.
6. *Ингеманссон А.Р.* Повышение работоспособности режущего инструмента при точении коррозионно-стойких сталей с опережающим пластическим деформированием // Металлообработка. 2011. № 6. С. 10–15.
7. *Полянчиков Ю.Н., Крайнев Д.В., Норченко П.А., Ингеманссон А.Р.* / под ред. А.П. Бабичева. Совершенствование получистового и чистового точения нержавеющей и жаропрочных сталей путем использования опережающего пластического деформирования. Волгоград: ВолгГТУ, ЗАО “ОНИКС”. 2012. 154 с.
8. *Barish M.* Plastic Deformation for Machining // Manufacturing Eng., 1977. Febr., P. 27–31.
9. *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.
10. *Akiyama Soso, Kumara Atsuyoshi, Nakamura Sadayuki.* Influence of Cold Working on Machinability // Denki-Seiko, Elec. Funace Steel, 1980. Vol. 51. No. 3. P. 188–194.
11. *Подураев В.Н., Ярославцев В.М., Ярославцева Н.А.* Исследование свойств материала срезаемого слоя при точении с ОПД // Известия высших учебных заведений. Машиностроение. 1974. № 12. С. 145–149.
12. *Ярославцев В.М.* Определение оптимальных режимов накатки роликом при точении с опережающим пластическим деформированием // Известия высших учебных заведений. Машиностроение. 1980. № 10. С. 124–127.
13. *ГОСТ 18296–72.* Обработка поверхностным пластическим деформированием. Термины и определения. М.: Госстандарт, 1972. 10 с.
14. *Кудрявцев В.С.* Поверхностный наклеп для повышения прочности и долговечности деталей машин. М.: НТО МАШПРОМ, 1966. 97 с.
15. *Одинцов Л.Г.* Упрочнение и отделка деталей поверхностным пластическим деформированием: Справочник. М.: Машиностроение, 1987. 328 с.
16. *Шнейдер Ю.Г.* Холодная бесштамповая обработка металлов давлением. Л.: Машиностроение, 1967. 352 с.
17. *Подураев В.Н., Ярославцев В.М., Ярославцева Н.А.* Эффективность обработки резанием с опережающим пластическим деформированием // Известия высших учебных заведений. 1972. № 12. С. 58–61.
18. *Ярославцев В.М., Симонов А.Г.* Влияние ультразвукового упрочнения на процесс резания с опережающим пластическим деформированием // Обработка материалов резанием. М.: МДНТП, 1979. С. 58–62.
19. *Ярославцев В.М., Симонов А.Г.* Применение выглаживания для опережающего пластического деформирования материала срезаемого слоя при наружном точении // Известия высших учебных заведений. Машиностроение. 1980. № 2. С. 117–119.

20. Ярославцев В.М., Симонов А.Г. Эффективность применения центробежной обработки при точении с опережающим пластическим деформированием // Известия высших учебных заведений. Машиностроение. 1990. № 2. С. 153–156.
21. Ярославцев В.М., Симонов А.Г. Обработка резанием с опережающим пластическим деформированием чеканкой // Известия высших учебных заведений. Машиностроение. 1990. № 4. С. 129–132.

## REFERENCES

- [1] Yaroslavtseva N.A., Yaroslavtsev V.M., Poduraev V.N. Sposob obrabotki rezaniem [Method of processing by cutting]. Author's certificate USSR, no. 358089, 1972.
- [2] Yaroslavtsev V.M., Sposob obrabotki rezaniem s operezhayushchim plasticheskim deformirovaniem [Method of processing by cutting with leading plastic deforming]. Author's certificate USSR no. 407648, 1974.
- [3] Yaroslavtsev V.M. Rezanie s operezhayushchim plasticheskim deformirovaniem [Cutting with leading plastic deforming]. Moscow, MG TU im. N.E. Bauman Publ., 2010. 46 p.
- [4] Polyanchikov Yu.N., Kraynev D.V., Norchenko P.A., Ingemansson A.R. Improvement of roughness parameters for cutting with leading plastic deforming. *Vestn. Saratov Gos. Univ.* [Herald of the Saratov State Univ.], 2010, no. 1 (44), pp. 67–71 (in Russ.).
- [5] Norchenko P. A. Povyshenie effektivnosti protsessa rezaniya nerzhavayushchikh staley austenitnogo klassa s operezhayushchim plasticheskim deformirovaniem. Diss...kand. tekhn. nauk [The efficiency improving of the process of cutting austenitic stainless steels with leading plastic deforming. Cand. tech. sci. diss.]. Volgograd, VolgGTU, 2010. 127 p.
- [6] Ingemansson, A R. Increase efficiency of the cutting tool in turning stainless steels with leading plastic deforming. *Metalloobrabotka* [Metalwork], 2011, no. 6, pp. 10–15 (in Russ.).
- [7] Polyanchikov Yu.N., Kraynev D.V., Norchenko P.A., Ingemansson A.R., Babichev A.P., eds. Sovershenstvovanie poluchistovogo i chistovogo tocheniya nerzhavayushchikh i zharoprochnykh staley putem ispol'zovaniya operezhayushchego plasticheskogo deformirovaniya [Semifinishing and finish turning perfection of stainless and heat resisting steels by using of leading plastic deforming]. Tol'yatti, ZAO "ONIKS" Publ., 2012. 154 p.
- [8] Barish M. Plastic deformation for machining. *Proc. Australian Conf. "Manufacturing Engineering"*, 1977, pp. 27–31.
- [9] Mototaro S., Yoshio K., Kasuhiro T. On the cutting mechanism of cold-rolled aluminum alloy. *J. Jpn. Inst. Light Metals*, 1978, vol. 28, no. 2, pp. 93–97.
- [10] Abeyama Sh., Kumara A., Nakamura S. Influence of cold working on machinability. *Denki-Seiko, Elec. Furnace Steel*, 1980, vol. 51, no. 3, pp. 188–194.
- [11] Poduraev V.N., Yaroslavtsev V.M., Yaroslavtseva N.A. The study of the material properties of cut down layer when turning with HPD. *Izv. Vyssh. Uchebn. Zaved., Mashinost.* [Proc. Univ., Mech. Eng.], 1974, no. 12, pp. 145–149 (in Russ.).
- [12] Yaroslavtsev V.M. Optimal regimes determination of running for rouletting while cutting with the leading plastic deforming. *Izv. Vyssh. Uchebn. Zaved., Mashinost.* [Proc. Univ., Mech. Eng.], 1980, no. 10, pp. 124–127 (in Russ.).
- [13] Standard RF: GOST 18296-72. Obrabotka poverkhnostnym plasticheskim deformirovaniem. Terminy i opredeleniya [Surface working. Terms and definitions]. Moscow, Gosstandart Publ., 1972. 10 p.
- [14] Kudryavtsev V.S. Poverkhnostnyy naklep dlya povysheniya prochnosti i dolgovечnosti detaley mashin Surface cold working for increased strength and durability of machine parts. Moscow, NTO MASHPROM Publ., 1966. 97 p.



- [15] Odintsov L.G. Uprochnenie i otdelka detaley poverkhnostnym plasticheskim deformirovaniem: Spravochnik [Hardening and finish details by using surface plastic deformation. Handbook]. Moscow, Mashinostroenie Publ., 1987. 328 p.
- [16] Shneyder Yu.G. Kholodnaya besshtampovaya obrabotka metallov davleniem [Cold metal-forming process]. Leningrad, Mashinostroenie Publ., 1967. 352 p.
- [17] Poduraev V.N., Yaroslavtsev V.M., Yaroslavtseva N.A. The efficiency of processing by cutting with leading plastic deforming. *Izv. Vyssh. Uchebn. Zaved., Mashinost.* [Proc. Univ., Mech. Eng.], 1972, no. 12, pp. 58–61 (in Russ.).
- [18] Yaroslavtsev V.M., Simonov A.G. Vliyanie ul'trazvukovogo uprochneniya na protsess rezaniya s operezhayushchim plasticheskim deformirovaniem. Obrabotka materialov rezaniem [Effect of ultrasonic hardening on the cutting process with leading plastic deforming. Machining of materials]. Moscow, MDNTP Publ., 1979. P. 58–62.
- [19] Yaroslavtsev V.M., Simonov A.G. The use of smoothing for leading plastic deforming of the cut down layer of the material at the outer turning. *Izv. Vyssh. Uchebn. Zaved., Mashinost.* [Proc. Univ., Mech. Eng.], 1980, no. 2, pp. 117–119 (in Russ.).
- [20] Yaroslavtsev V.M., Simonov A.G. The efficiency of the centrifugal processing when turning with leading plastic deforming. *Izv. Vyssh. Uchebn. Zaved., Mashinost.* [Proc. Univ., Mech. Eng.], 1990, no. 2, pp. 153–156 (in Russ.).
- [21] Yaroslavtsev V.M., Simonov A.G. Cutting with leading plastic deforming by caulking. *Izv. Vyssh. Uchebn. Zaved., Mashinost.* [Proc. Univ., Mech. Eng.], 1990, no. 4, pp. 129–132 (in Russ.).

Статья поступила в редакцию 18.03.2014

Ярославцев Виктор Михайлович — д-р техн. наук, профессор кафедры “Технологии обработки материалов” МГТУ им. Н.Э. Баумана. Автор более 290 научных работ в области теории резания, технологии производства летательных аппаратов, разработки новых методов обработки композиционных и труднообрабатываемых материалов. МГТУ им. Н.Э. Баумана, Российская Федерация, 105005, Москва, ул. 2-я Бауманская, д. 5.

Yaroslavtsev V.M. — Dr. Sci. (Eng.), professor of “Technologies of Treatment of Materials” department of the Bauman Moscow State Technical University. Author of more than 290 publications in the field of theory of cutting, technology of flying vehicles production, development of new methods for treatment of composite and churlish materials. Bauman Moscow State Technical University, 2-ya Baumanskaya ul. 5, Moscow, 105005 Russian Federation.