

Расчет и конструирование машин

УДК 621.99

DOI 10.18698/0536-1044-2016-12-3-8

Взаимосвязь точности обработки отверстий и точности углов режущей части машинных разверток

А.Е. Древалъ

МГТУ им. Н.Э. Баумана, 105005, Москва, Российская Федерация, 2-я Бауманская ул., д. 5, стр. 1

The Correlation Between the Accuracy of Hole Machining and the Accuracy of Angles of the Reamer Cutting Edge

A.E. Dreval

BMSTU, 105005, Moscow, Russian Federation, 2nd Baumanskaya St., Bldg. 5, Block 1 e-mail: dreval_a@mail.ru

i Рассмотрено влияние точности геометрических параметров машинных разверток на разбивку отверстий. Показано, что погрешности угла режущей части и углового шага зубьев в пределах одного инструмента приводят к изменениям толщины и ширины стружки, срезаемой отдельным зубом развертки. Изменения параметров стружки обуславливают различие сил резания, действующих на каждом зубе, и, как следствие, приводят к возникновению суммарной неуравновешенной радиальной силы, которая стремится изменить положение оси инструмента, что влияет на точность обрабатываемого отверстия. Влияние суммарной неуравновешенной радиальной силы на точность отверстий можно оценивать по суммарным погрешностям угловых параметров рабочей части инструмента, представив их в векторной форме. Экспериментально выявлено влияние суммарной погрешности углов режущей части на разбивку отверстий при развертывании инструментом с минимальной суммарной погрешностью углового шага зубьев. Установлено также влияние суммарной погрешности углового шага зубьев на разбивку отверстий при минимальной суммарной погрешности угла режущей части развертки. Определена эмпирическая зависимость разбивки отверстий при развертывании от совместного влияния суммарных погрешностей углов режущей части и шага между зубьями.

Ключевые слова: развертывание, машинные развертки, угол режущей части, угловой шаг зубьев, погрешность угла, суммарная погрешность, разбивка отверстия.

i The influence of the accuracy of machine reamer geometry on reaming of holes is considered in this article. It is shown that inaccuracies in the cutting point angle and the tooth pitch angle within one tool lead to changes in the thickness and width of the chips cut by a single tooth of the reamer. The changes in the chips are caused by the differences in the cutting forces acting on each tooth. It results in the occurrence of a total unbalanced radial force that tries to change the position of the tool axis, which impacts the accuracy of the machined hole. The influence of the total unbalanced radial force on the accuracy of the

holes can be assessed by the total errors of the angular parameters of the tool working edges, represented in the vector form. The author determines experimentally the influence of the total errors of the cutting edge angles on reaming when using tools with minimal total errors of the tooth pitch angles. The influence of the total errors of the tooth pitch angle on reaming with minimal total errors of the angles of the reamer cutting edge is also determined by this study. The empirical dependence of hole widening on the joint influence of the total errors of the cutting edge angles and the tooth pitch angles is determined.

Keywords: reaming, machine reamer, cutting edge angle, tooth pitch angle, angle error, total error, hole widening.

Анализ нормативной документации показывает, что отклонения ряда геометрических параметров рабочей части машинных разверток не нормированы, также не предусмотрены ограничения на рассеивание этих параметров в пределах одного многозубого инструмента. Это оказывает непосредственное влияние на параметры срезаемого слоя, и условия работы каждого режущего лезвия отличаются друг от друга. Как следствие, лезвия имеют неодинаковые значения износа в пределах одного инструмента, а возникшие различия в силах, приложенных к разным зубьям, приводят к появлению неуравновешенных радиальных сил. Последние оказывают влияние на точность обработки — разбивку отверстий при развертывании.

Цель работы — определение взаимосвязи точности обработки отверстий и точности углов режущей части машинных разверток.

Рассмотрим влияние рассеивания геометрических параметров в пределах одного инструмента на разбивку отверстий при развертывании. Погрешность изготовления угла рабочей части φ разверток в соответствии

с ГОСТ 1523–81 («Развертки цилиндрические. Технические условия») не нормируется как в целом, так и в пределах одного инструмента по каждому зубу. По сравнению с другими углами развертки — задним α , передним γ и углом наклона режущей кромки λ — угол рабочей части φ оказывает непосредственное влияние на толщину a_z и ширину b срезаемой стружки каждой режущей кромкой (рис. 1), так как $a_z = (S_0/z)\sin\varphi$, $b = t/\sin\varphi$, где S_0 — подача, мм/об; t — глубина резания, мм; z — количество зубьев инструмента.

Угловой шаг зубьев ε разверток либо специально выполняют неодинаковым [1] (в целях предотвращения появления на поверхности обработанного отверстия продольных рисок), либо не нормируют. В первом случае угловой шаг определяют по формуле $\varepsilon = (360^\circ/z) \pm \Delta\varepsilon$, где рекомендуемые значения $\Delta\varepsilon$ выбирают в зависимости от числа зубьев инструмента [2]. Во втором случае угол ε все равно получается неравномерным вследствие погрешностей, возникающих в ходе технологического процесса изготовления развертки.

Угол ε (как и угол φ) оказывает непосредственное влияние на толщину стружки, срезаемой каждой режущей кромкой развертки. При соотношении $\varepsilon_1 \neq \varepsilon_2 \neq \dots \neq \varepsilon_i$ толщина срезаемого слоя

$$a_{zi} = \frac{S_0 (\varepsilon \pm \Delta\varepsilon_i)}{360^\circ} \sin\varphi.$$

Таким образом, рассеивание углов φ_i и ε_i приводит к рассеиванию толщины и ширины стружки, срезаемой каждым зубом инструмента, и предопределяет рассеивание радиальных составляющих сил резания P_i , которые действуют в плоскости, перпендикулярной оси инструмента. Вследствие различия радиальных сил P_i возникает неуравновешенная результирующая сила $\mathbf{R} = \sum P_i$, которая для данного инструмента постоянна по абсолютной величине и также ориентирована в плоскости, пер-

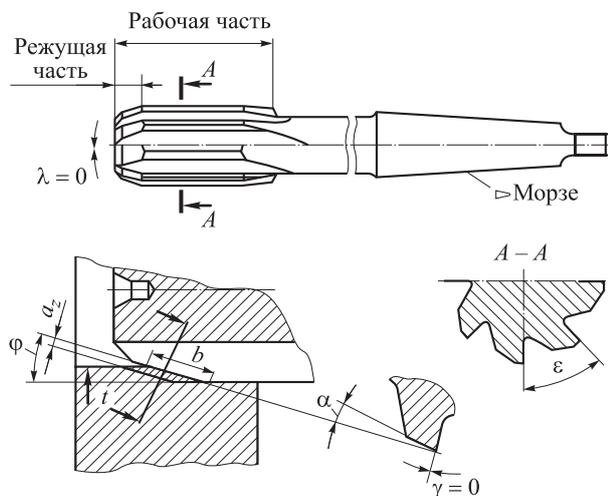


Рис. 1. Основные конструктивные и геометрические элементы машинных разверток

пендикулярной оси развертки, под постоянным углом. Сила **R** циркулирует и стремится изменить положение оси инструмента при развертывании, что влияет на точность обработки.

Погрешности углов режущей части φ_i и углового шага зубьев ε_i разверток определяются по соответствующим зависимостям: $\Delta\varphi_i = \varphi_n - \varphi_i$ и $\Delta\varepsilon_i = \varepsilon_n - \varepsilon_i$, где φ_n , ε_n и φ_i , ε_i — номинальные и текущие значения соответственно углов режущей части и углового шага зубьев. О неуравновешенной радиальной силе **R** можно судить по суммарным погрешностям углов разверток φ_i и ε_i , представив их в векторной форме

$$\Delta\varphi_\Sigma = \sum \Delta\varphi_i \text{ и } \Delta\varepsilon_\Sigma = \sum \Delta\varepsilon_i,$$

или, переходя к неуравновешенным силам:

$$\mathbf{R}_1 = k_1 \Delta\varphi_\Sigma \text{ и } \mathbf{R}_2 = k_2 \Delta\varepsilon_\Sigma,$$

где k_1 и k_2 — коэффициенты пропорциональности влияния на радиальную неуравновешенную силу суммарных погрешностей указанных углов. Поскольку значения коэффициентов k_1 и k_2 неизвестны, их определение требует дополнительных трудоемких исследований.

Ввиду того, что вектор силы циркулирует, его угловое положение оказывает одинаковое влияние на разбивку отверстия во всех направлениях. Поэтому задача сводится к установлению влияния модулей векторов суммарных погрешностей углов $\Delta\varphi_\Sigma$ и $\Delta\varepsilon_\Sigma$ на разбивку и к оценке распределения этих параметров при различных отклонениях углов $\Delta\varphi_i$ и $\Delta\varepsilon_i$. Очевидно, что влияние $\Delta\varphi_\Sigma$ и $\Delta\varepsilon_\Sigma$ на разбивку будет зависеть и от конструктивных особенностей разверток [3] (диаметра d , числа зубьев z , ширины ленточек f_n), биения лезвий [4], режимов обработки [5], состояния технологической системы [6] и других конструктивных показателей и технологических условий развертывания [7].

Для определения значений $\Delta\varphi_\Sigma$ и $\Delta\varepsilon_\Sigma$ исследована партия разверток объемом 100 шт., имевших следующие параметры: количество зубьев $z = 8$; расчетный угловой шаг зубьев $\varepsilon = 45^\circ$; номинальные углы — передний $\gamma_n = 0^\circ$, задний $\alpha_n = 10^\circ$, наклона режущего лезвия $\lambda_n = 0^\circ$ и режущей части $\varphi_n = 15^\circ$. Результаты измерений показали, что значения угла режущей части φ и углового шага ε отклоняются от номинальных в пределах как партии разверток, так и одного инструмента. Распределение углов φ и ε согласуется с законом Гаусса [8].

Анализ векторных многоугольников погрешностей углов $\Delta\varphi_i$ и $\Delta\varepsilon_i$ позволил уста-

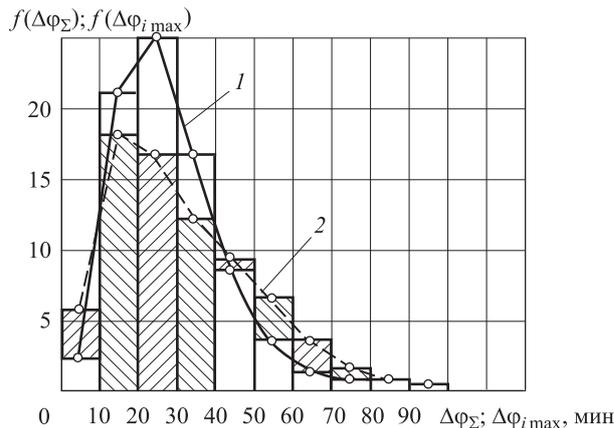


Рис. 2. Распределение модулей суммарных погрешностей угла режущей части $\Delta\varphi_\Sigma$ (1) и максимальных разностей углов $\Delta\varphi_{i \max}$ на противоположных зубьях разверток (2)

новить, что значения модулей суммарных погрешностей $\Delta\varphi_\Sigma$ и $\Delta\varepsilon_\Sigma$ тесно связаны с максимальными разностями углов на противоположных зубьях $\Delta\varphi_{i \max}$ и $\Delta\varepsilon_{i \max}$, что показано на примере распределения погрешностей углов режущей части $\Delta\varphi_i$, приведенном на рис. 2.

На основе корреляционного анализа установлены линейные зависимости между максимальной разностью углов на противоположных зубьях $\Delta\varphi_{i \max}$ и $\Delta\varepsilon_{i \max}$ и модулями суммарных погрешностей $\Delta\varphi_\Sigma$ и $\Delta\varepsilon_\Sigma$, коэффициенты корреляции составили соответственно 0,84 и 0,71. С помощью метода наименьших квадратов [9] определены регрессионные зависимости между указанными параметрами:

$$\begin{aligned} \Delta\varphi &= 1,15\Delta\varphi_{i \max} + 1,73; \\ \Delta\varepsilon &= 0,86\Delta\varepsilon_{i \max} + 19,6. \end{aligned} \tag{1}$$

Как видно из представленных уравнений, наиболее эффективного уменьшения суммарных погрешностей $\Delta\varphi_\Sigma$ и $\Delta\varepsilon_\Sigma$ можно достигнуть за счет снижения максимальной погрешности на противоположных зубьях.

Распределение модулей суммарных погрешностей $\Delta\varphi_\Sigma$ и $\Delta\varepsilon_\Sigma$ хорошо согласуется с законом гамма-распределения (рис. 3).

Влияние параметров $\Delta\varphi$ и $\Delta\varepsilon$ на разбивку изучено на примере развертывания сквозных отверстий диаметром $d = 14,55$ мм, глубиной $l = 35$ мм в стали 45 твердостью 195...200 НВ. В качестве СОЖ использовался 5%-ный раствор эмульсола, скорость резания v изменялась в диапазоне 4...23 м/мин, подача $S_o = 0,2$ мм/об, глубина резания $t = 0,15$ мм. Отверстия в заготовках получены зенкерованием с применени-

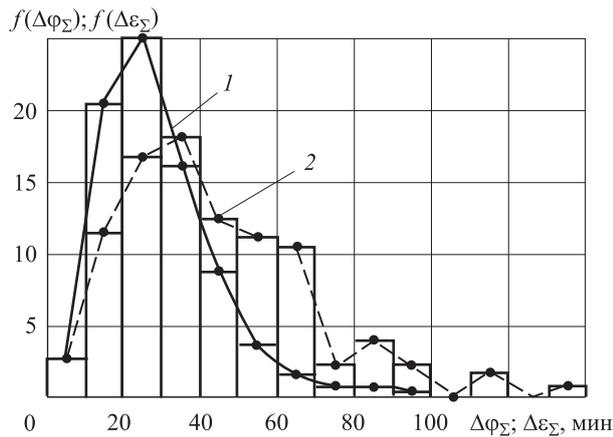


Рис. 3. Распределение модулей суммарных погрешностей угла режущей части $\Delta\varphi_{\Sigma}$ (1) и углового шага зубьев $\Delta\varepsilon_{\Sigma}$ (2)

ем плавающего закрепления разверток. Разбивку определяли как разность $\Delta p = d_o - d_p$, где d_o — диаметр обработанного отверстия; d_p — диаметр развертки. Измерение диаметра d_o выполняли нутромером модели 105. Диаметр определяли как среднее значение из шести измерений, выполненных в трех сечениях отверстия в двух взаимно перпендикулярных направлениях. Каждый опыт повторяли 10 раз.

Влияние модулей суммарных погрешностей $\Delta\varphi_{\Sigma}$ и $\Delta\varepsilon_{\Sigma}$ на среднюю разбивку отверстий Δp при различных значениях скорости резания v приведено на рис. 4.

Зависимости, приведенные на рис. 4, а и б, получены при соответствующих минимальных значениях $\Delta\varphi_{\min}$ и $\Delta\varepsilon_{\min}$ искусственным подбором разверток из обследованной партии инструментов. Совместное воздействие суммарных погрешностей $\Delta\varphi_{\Sigma}$ и $\Delta\varepsilon_{\Sigma}$ представлено на рис. 4, в и может быть описано уравнением

$$\Delta p = c_p \Delta\varphi^{c_1} \Delta\varepsilon^{c_2}, \quad (2)$$

где c_p , c_1 и c_2 — постоянные коэффициенты.

Определение коэффициентов уравнения (2) выполнено экспериментально с использовани-

ем полнофакторного планирования вида 2^2 . Окончательно зависимость имеет вид

$$\Delta p = 30,4 \Delta\varphi_{\Sigma}^{0,35} \Delta\varepsilon_{\Sigma}^{0,28}.$$

С учетом случайного характера суммарных погрешностей $\Delta\varphi_{\Sigma}$ и $\Delta\varepsilon_{\Sigma}$ необходимо оценить рассеивание разбивки отверстий. Среднее квадратическое отклонение результата можно определить с использованием соотношений [10]

$$S_{\Delta p}^2 = \left(\frac{\partial \Delta p}{\partial \Delta\varphi_{\Sigma}} \right)_{\Delta\varepsilon} S_{\Delta\varphi}^2 + \left(\frac{\partial \Delta p}{\partial \Delta\varepsilon_{\Sigma}} \right)_{\Delta\varphi} S_{\Delta\varepsilon}^2,$$

где $S_{\Delta p}$ — среднее квадратическое отклонение разбивки отверстий; $S_{\Delta\varphi}$ и $S_{\Delta\varepsilon}$ — средние квадратические отклонения суммарных погрешностей углов режущей части φ и углового шага зубьев развертки ε ; $\partial \Delta p / \partial \Delta\varphi_{\Sigma}$ и $\partial \Delta p / \partial \Delta\varepsilon_{\Sigma}$ — частные производные разбивки по параметрам $\Delta\varphi_{\Sigma}$ и $\Delta\varepsilon_{\Sigma}$.

Продифференцировав уравнение (2), получим

$$S_{\Delta p}^2 = (c_1 \Delta\varphi^{c_1-1} \Delta\varepsilon^{c_2}) S_{\Delta\varphi}^2 + (c_2 \Delta\varphi^{c_1} \Delta\varepsilon^{c_2-1}) S_{\Delta\varepsilon}^2. \quad (3)$$

Уравнения (2) и (3) позволяют определить ожидаемую разбивку отверстий Δp и ее среднее квадратическое значение по известным суммарным погрешностям $\Delta\varphi_{\Sigma}$ и $\Delta\varepsilon_{\Sigma}$ и их средним квадратическим отклонениям $S^2(\Delta\varphi)$ и $S^2(\Delta\varepsilon)$.

Выводы

1. Заметное влияние на разбивку отверстий происходит при развертывании инструментом с суммарными погрешностями $\Delta\varphi_{\Sigma}$ и $\Delta\varepsilon_{\Sigma}$, превышающими $30'$ при всех скоростях резания.

2. Влияние суммарной погрешности угла режущей части $\Delta\varphi_{\Sigma}$ на разбивку больше соответствующего влияния суммарной погрешности углового шага зубьев $\Delta\varepsilon_{\Sigma}$.

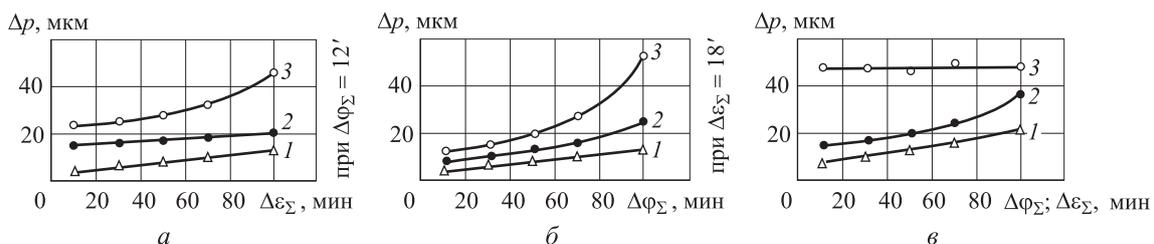


Рис. 4. Зависимости разбивки отверстий Δp от модулей суммарных погрешностей углового шага $\Delta\varepsilon_{\Sigma}$ (а), угла режущей части $\Delta\varphi_{\Sigma}$ (б) и от совместного влияния $\Delta\varphi_{\Sigma}$ и $\Delta\varepsilon_{\Sigma}$ (в):

1 — $v = 4,08$ м/мин; 2 — $v = 11,4$ м/мин; 3 — $v = 16,2$ м/мин

3. Совместное воздействие погрешностей $\Delta\varphi_{\Sigma}$ и $\Delta\varepsilon_{\Sigma}$ оказывает наибольшее влияние на разбивку отверстий и особенно при скорости резания, превышающей 12 м/мин. В этом случае разбивка отверстий Δr превышает значение допуска, соответствующее Н9.

4. Работоспособность машинных разверток, оцениваемая по технологическому показателю (точности диаметрального размера), зависит от точности углов режущей части и углового шага зубьев в пределах одного инструмента. У 70 % обследованных разверток суммарные погрешности $\Delta\varphi_{\Sigma}$ и $\Delta\varepsilon_{\Sigma}$ изменялись от 5' до 1°.

В этом диапазоне значений при скорости резания до 10 м/мин их суммарное влияние составляет 5...7 мкм.

При повышении скорости обработки и изменении указанного диапазона значений $\Delta\varphi_{\Sigma}$ и $\Delta\varepsilon_{\Sigma}$ в сторону увеличения необходимо нормировать точность угла режущей части φ и углового шага зубьев ε в пределах одного инструмента. Наиболее рациональным представляется нормировать максимальную разность $\Delta\varphi_{i \max}$ и $\Delta\varepsilon_{i \max}$ на противоположных зубьях, используя уравнение (1).

Литература

- [1] Виноградов Д.В. Цилиндрические развертки: типы и размеры. *Инженерный вестник*, 2013, № 04, с. 13–26.
- [2] ГОСТ 7722–77. *Развертки ручные цилиндрические. Конструкция и размеры*. Введен 1978–01–01. Москва, Изд-во стандартов, 1987. 14 с.
- [3] Кирсанов С.В. Влияние конструкции развертки на огранку обработанных отверстий. *СТИН*, 2000, № 4, с. 22–23.
- [4] Железнов Г.С., Железнова С.Г. Влияние биения режущей части развертки на образование отклонений размера и формы обработанной поверхности. *СТИН*, 2012, № 11, с. 11–14.
- [5] Холмогорцев Ю.П. Влияние условий резания при развертывании отверстий на шероховатость поверхности вязких сталей. *Вестник машиностроения*, 2001, № 3, с. 38–40.
- [6] Железнов Г.С., Широков А.Б. Влияние отклонения оси развертки от оси вращения шпинделя станка на разбивку обработанного отверстия. *СТИН*, 2015, № 12, с. 28–32.
- [7] Агапов С.И., Парецкий Д.Е., Федянова Н.А. Влияние геометрии инструмента на точность отверстий при ультразвуковом развертывании. *Обработка металлов (технология, оборудование, инструменты)*, 2002, № 4, с. 36–38.
- [8] Древаль А.Е., Татаринев А.С., Новотоцких О.А. Взаимосвязь угла режущей части развертки с работоспособностью инструмента. *Известия высших учебных заведений. Машиностроение*, 1985, № 3, с. 121–124.
- [9] Вентцель Е.С. *Теория вероятностей*. Москва, Высшая школа, 2006. 575 с.
- [10] Шенк Х. *Теория инженерного эксперимента*. Москва, Мир, 1972. 384 с.

References

- [1] Vinogradov D.V. Tsilindricheskie razvertki: tipy i razmery [Helical Scan: types and sizes]. *Inzhenernyi vestnik* [Engineering Gazette]. 2013, no. 04, pp. 13–26
- [2] GOST 7722–77. *Razvertki ruchnye tsilindricheskie. Konstruktsiia i razmery* [State Standard 7722–77. Cylindrical hand reamers. Design and dimensions]. Moscow, Standartinform publ., 1987. 14 p.
- [3] Kirsanov S.V. Vliianie konstruktsii razvertki na ogranku obrabotannykh otverstii [Influence Sweep design for cutting the processed holes]. *STIN* [Russian Engineering Research]. 2000, no. 4, pp. 22–23.
- [4] Zheleznov G.S., Zheleznova S.G. Vliianie bieniia rezhushchii chasti razvertki na obrazovanie otklonenii razmera i formy obrabotannoi poverkhnosti [Impact beats cutting of the scan on the formation and size of deviations form the treated surface]. *STIN* [Russian Engineering Research]. 2012, no. 11, pp. 11–14.
- [5] Kholmogortsev Iu.P. Vliianie uslovii rezaniia pri razvertyvanii otverstii na sherokhovatost' poverkhnosti viazkikh stalei [Influence of cutting conditions for the deployment of the

- holes on the steel surface roughness viscous]. *Vestnik mashinostroeniia* [Russian Engineering Research]. 2001, no. 3, pp. 38–40.
- [6] Zheleznov G.S., Shirokov A.B. Vliianie odkloneniia osi razvertki ot osi vrashcheniia shpindel'ia stanka na razbivku obrabotannogo otverstiia [Effect of deviation from the scan axis of the spindle axis of rotation of the machine on the breakdown of the processed holes]. *STIN* [Russian Engineering Research]. 2015, no. 12, pp. 28–32.
- [7] Agapov S.I., Paretskii D.E., Fedianova N.A. Vliianie geometrii instrumenta na tochnost' otverstii pri ul'trazvukovom razvertyvanii [Influence of tool geometry on the accuracy of the openings by ultrasound deployment]. *Obrabotka metallov (tekhnologiia, oborudovanie, instrumenty)* [Processing of metals (technology, equipment, tools)]. 2002, no. 4, pp. 36–38.
- [8] Dreval' A.E., Tatarinov A.S., Novototskikh O.A. Vzaimosviaz' ugla rezhushchei chasti razvertki s rabotosposobnost'iu instrumenta [The relationship of the cutting angle of the sweep with the performance of the tool]. *Izvestiia vysshikh uchebnykh zavedenii. Mashinostroenie* [Proceedings of Higher Educational Institutions. Machine Building]. 1985, no. 3, pp. 121–124.
- [9] Venttsel' E.S. *Teoriia veroiatnostei* [Probability theory]. Moscow, Vysshaia shkola publ., 2006. 575 p.
- [10] Shenk Kh. *Teoriia inzhenerenogo eksperimenta* [Theory of engineering experiment]. Moscow, Mir publ., 1972. 384 p.

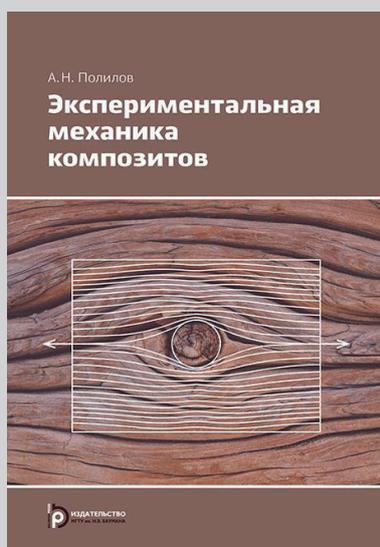
Статья поступила в редакцию 31.08.2016

Информация об авторе

ДРЕВАЛЬ Алексей Евгеньевич (Москва) — доктор технических наук, профессор, зав. кафедрой «Инструментальная техника и технологии». МГТУ им. Н.Э. Баумана (105005, Москва, Российская Федерация, 2-я Бауманская ул., д. 5, стр. 1, e-mail: dreval_a@mail.ru).

Information about the author

DREVAL Aleksey Evgenievich (Moscow) — Doctor of Science (Eng.), Professor, Head of Tools and Tooling Technologies Department. Bauman Moscow State Technical University (105005, Moscow, Russian Federation, 2nd Baumanskaya St., Bldg. 5, Block 1, e-mail: dreval_a@mail.ru).



В Издательстве МГТУ им. Н.Э. Баумана
вышло в свет 2-е издание учебного пособия

А.Н. Полилова

«Экспериментальная механика композитов»

Изложены научные основы экспериментальных исследований композитных материалов-конструкций. Обоснованы экспериментальные методы определения полного набора упругих и прочностных констант ортотропных композитов. Приведены методы исследования ползучести и высокоскоростного деформирования композитов, модели и критерии разрушения анизотропных волокнистых композитов с полимерной матрицей. Предложены энергетические критерии развития расслоений и расщеплений в композитах. Рассмотрено влияние концентрации напряжений на прочность композитных деталей. Представлены оригинальные модели разрушения композитов, а также расчетные методы, отличающиеся от стандартных.

Содержание учебного пособия соответствует курсу лекций, читаемых автором в МГТУ им. Н.Э. Баумана.

По вопросам приобретения обращайтесь:

105005, Москва, 2-я Бауманская ул., д. 5, стр. 1.
Тел.: +7 499 263-60-45, факс: +7 499 261-45-97;
press@bmstu.ru; www.baumanpress.ru