

Влияние погрешностей формообразующих элементов метчиков на радиальную силу

© И.В. Иванина

МГТУ им. Н.Э. Баумана, Москва, 105005, Россия

Представлено аналитическое описание резбовой пары инструмент — деталь как сложного геометрического объекта с определенной точностью исполнения его элементов. Приведен анализ меры влияния составляющих погрешностей изготовления режущей части инструмента на динамику резбонарезания. Показано, что для метчиков всех классов точности изготовления наибольший удельный вес имеет составляющая радиальной силы от погрешности собственно среднего диаметра резьбы. Рассмотрена возможность расчета динамических характеристик по действительному контуру резбового профиля, используемая на этапе конструирования и нормирования точности изготовления формообразующих элементов резбонарезного инструмента, реализующего генераторную схему резания.

Ключевые слова: *резбонарезание, генераторная схема резания, метчик, допуск, погрешность, точность, параметры срезаемого слоя, радиальная сила*

Машинные метчики можно отнести к одним из наиболее сложных и наименее надежных инструментов. Основными причинами неточности параметров нарезаемой резьбы в большинстве исследований [1, 2, 4–10] называют осевые и радиальные силы, которые воздействуют на метчик. Наличие переменных осевых и радиальных сил резания, нарушающих кинематику процесса резбонарезания, определяется особенностями исполнения конструктивных элементов режущей части резбонарезного инструмента: сложной геометрической формой режущего зуба, разной длиной и числом режущих лезвий, участвующих в срезании припуска, расположением элементарных режущих профилей в разных плоскостях.

Известно достаточное количество работ, посвященных исследованиям влияния конструктивных и геометрических параметров инструмента на динамику и точность резбонарезания. Авторами работ [6, 7] установлена корреляция точности нарезаемых резьб и сил резания. Графические зависимости главного угла в плане ϕ от составляющих сил резания, представленные в работах [2, 8, 9], получены в результате компьютерного моделирования. Определены также значения угла ϕ , рациональные с точки зрения уменьшения крутящего момента, исследовано влияние погрешности углового шага на динамику и точность нарезания резьб [4, 5].

Полученные результаты этих исследований имеют в основном экспериментальный характер, что позволяет учитывать только огра-

ническое число номинальных параметров без аналитического описания резбовой пары инструмент — деталь как сложного геометрического объекта с определенной точностью исполнения его элементов.

Поэтому целью настоящей работы является определение взаимосвязи между динамическими характеристиками формирования резбы и установленными допусками на основные формообразующие элементы режущей части резбового профиля метчика.

При нарезании резб метчиками размеры инструмента воспроизводятся на изделии с искажениями. Возникает разбивка резбового отверстия Δ , которую считают как разность собственных средних диаметров резбовой пары инструмент — деталь или определяют через приведенный средний диаметр:

$$\Delta = (\Delta D_{2K} - \Delta d_2) + f_P + f_\alpha,$$

где ΔD_{2K} — собственный средний диаметр резбового калибра; Δd_2 — собственный средний диаметр метчика; f_P и f_α — диаметральные компенсации накопленной погрешности шага и половины угла профиля соединения калибр — метчик.

В рамках теории точности обработки внутренних резбовых поверхностей метчиками [1] определена структурная схема влияния технологических факторов на размеры резбы, согласно которой точность приведенного среднего диаметра резбового отверстия в основном определяется нарушением параметра винтового движения инструмента и производящим средним диаметром метчика.

Метчики относятся к мерным инструментам, т. е. «передают» исполнительные размеры своих конструктивных элементов изделию. Значение производящего среднего диаметра определяется точностью изготовления метчика и зависит от собственного среднего диаметра инструмента, погрешности шага и погрешности половины угла профиля резбы. Собственно, средний диаметр d_2 , шаг P и угол профиля α являются основными параметрами резбы, определяющими характер контакта резбового соединения, его прочность, жесткость, точность поступательного перемещения и другие эксплуатационные характеристики. Мера их рассеяния влияет на составляющие силы резания, а следовательно, на кинематику и точность процесса резбообразования.

В целях определения влияния точности исполнительных элементов метчика на динамику резания за основу были приняты обобщенные [11] уравнения зависимости составляющих сил резания \vec{P}_{yi} и \vec{P}_{zi} от длин главного l_g и вспомогательных режущих лезвий при заданной толщине срезаемого слоя a_z и математическая модель [3] определения параметров сечения срезаемого слоя путем имитации пересечения образующей режущего конуса метчика с контуром теоретического (номинального) профиля резбы.

Абсолютное значение и направление действия вектора суммарной радиальной силы $\overline{P_{r_i}}$ на i -м режущем профиле определяется совместным действием двух векторов — радиальной $\overline{P_{y_i}}$ и тангенциальной $\overline{P_{z_i}}$ составляющих силы резания:

$$\overline{P_{r_i}} = \Sigma(\overline{P_{y_i}}; \overline{P_{z_i}}),$$

где $\overline{P_{y_i}}$ и $\overline{P_{z_i}}$ — равнодействующие составляющие силы резания на i -м элементарном режущем профиле; i — порядковый номер режущего профиля при отсчете по винтовой линии.

Суммарная радиальная сила $\overline{P_{r_i}}$ в момент врезания i -го профиля на расчетную толщину среза определена как накопленная векторная сумма:

$$\overline{P_{r_i}} = \sum_{i=1}^i \overline{P_{r_i}}.$$

В принятой инструментальной системе координат OXY абсолютное значение вектора радиальной силы определялось через проекции на оси X и Y :

$$|\overline{P_{r_i}}| = \sqrt{(\text{Пр}_X \overline{P_{r_i}})^2 + (\text{Пр}_Y \overline{P_{r_i}})^2}. \tag{1}$$

Далее (для краткости) накопленную векторную сумму на i -м режущем профиле $\overline{P_{r_i}}$ назовем радиальной силой и обозначим P_r .

Форма и размеры сечения срезаемого слоя зависят от кинематической схемы резания и расположения режущих элементов инструмента. Длина главных режущих лезвий l_{g_i} (рис. 1) определяется как результат пересечения контура профиля резьбы с образующей

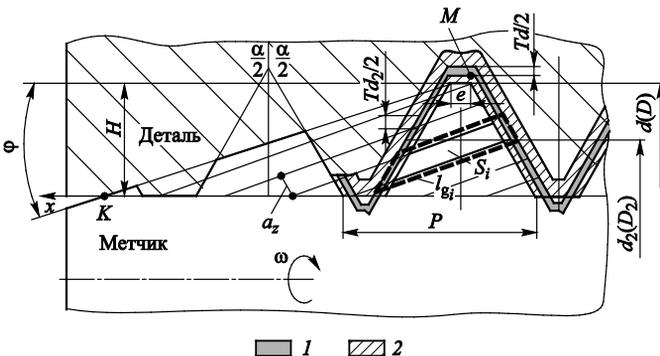


Рис. 1. Схема формирования профиля резьбы; профиль и предельные контуры резьбового соединения метчик — гайка:
 поля допуска:
 1 — болта; 2 — гайки

режущего конуса $KM(x)$ при ее осевом перемещении x вдоль оси резьбы [3]:

$$l_g(x) = \begin{cases} \frac{x \sin \alpha}{\sin(\alpha + \varphi)}, & \text{если } x \leq e + \frac{2H}{\operatorname{tg} \alpha}, \\ \frac{x \sin \alpha}{\sin(\alpha + \varphi)} - \frac{\left(x - e - \frac{2H}{\operatorname{tg} \alpha}\right) \sin \alpha}{\sin(\alpha - \varphi)}, & \text{если } e + \frac{2H}{\operatorname{tg} \alpha} < x \leq \frac{H \sin(\alpha + \varphi)}{\sin \alpha \sin \varphi}, \\ \frac{H}{\sin \alpha} - \frac{\left(x - e - \frac{2H}{\operatorname{tg} \alpha}\right) \sin \alpha}{\sin(\alpha - \varphi)}, & \text{если } \frac{H \sin(\alpha + \varphi)}{\sin \alpha \sin \varphi} < x < \frac{H \sin(\alpha + \varphi)}{\sin \alpha \sin \varphi} + e, \end{cases} \quad (2)$$

где $x = \frac{P\omega}{2\pi}$ — смещение инструмента в осевом направлении в соответствии с углом поворота ω ; e — величина притупления вершин.

Аналогично, как функция осевого перемещения инструмента x , определены активные длины вспомогательных режущих кромок выходной b_p и заходной b_l сторон элементарных режущих профилей:

$$b_p, b_l = f(\alpha, \varphi, e, x).$$

Рассмотрим случай, когда действительный резьбовой контур метчика совпадает с наибольшим предельным контуром. На рис. 1 заштрихована площадь поперечного сечения слоя S_i , срезаемого i -м режущим профилем. Наличие допуска на резьбовой профиль инструмента определяет диапазон рассеяния величины S_i — изменяются длины главных режущих лезвий l_{gi} , рабочая высота профиля резьбы H , собственный средний диаметр инструмента d_2 , величина притупления вершин e . Поскольку для метрической резьбы диаметров М0,25–М600, профиль и размеры элементов которой регламентированы ГОСТ 9150–81, конструктивные параметры H и e в уравнении (2) можно выразить через шаг резьбы P : $H = \frac{5P}{16 \operatorname{tg}(\alpha/2)}$;

$e = \frac{P}{8}$, то влияние всех перечисленных выше факторов на форму и размеры поперечного сечения слоя срезаемого материала, а следовательно, и на силовые характеристики, сводится к четырем основным параметрам инструмента и координате x его осевого перемещения:

$$S_i = f(d_2, P, \alpha, \varphi, x).$$

Поскольку у резцов с прямолинейной формой боковых сторон профиля накопленная погрешность шага и погрешность половины угла профиля могут быть скомпенсированы за счет изменения среднего диаметра, то предельные отклонения шага резьбы ΔP и половины угла профиля $\Delta\alpha/2$, установленные для метчиков ГОСТ 16925–93, при расчете радиальной силы P_r учитываются через диаметральные компенсации f_P и f_α :

$$f_P = 1,723\Delta P,$$

$$f_\alpha = 0,36 \cdot 10^{-3} P \Delta\alpha/2,$$

где f_P и f_α — диаметральные компенсации накопленных погрешностей шага и половины угла профиля резьбы.

При расчете было принято, что составляющие погрешности входят в результат своими наибольшими (с учетом знака) предельными значениями, а значение допуска на производящий средний диаметр можно определить алгебраическим суммированием:

$$Td_2 = \Delta Td_2 + f_P + f_\alpha,$$

где ΔTd_2 — допуск собственно среднего диаметра метчика.

Погрешность главного угла в плане ϕ , возникающая при заточке метчика, совместно с отклонением расположения — несоосности оси симметрии и оси вращения инструмента — приводит к биению кромок главных режущих лезвий. В технических условиях ГОСТ 3449–89 в зависимости от класса точности метчиков на наружный диаметр в направлении, перпендикулярном главным режущим лезвиям, установлен допуск биения режущей части Δ_b . Влияние биения Δ_b на площади сечения слоев S_i , срезаемых элементарными режущими профилями, выражается в перераспределении толщины среза a_z между режущими зубьями в пределах одного инструмента, при этом допуск Δ_b определяет наибольшее возможное отклонение от расчетной величины

$$a_z = \frac{P \sin \phi}{z}.$$
 С определенными допущениями в расчете составляю-

щих сил резания возможен учет биения главных режущих кромок, но в таком случае требуется предварительная аттестация каждого инструмента в целях определения пары режущих зубьев, перераспределяющих между собой расчетную толщину срезаемого слоя a_z (в настоящей работе этот вопрос не рассматривается).

Для метчиков 2-го и 4-го классов точности (исходные данные приведены в таблице) с использованием уравнения (1) получены графики измерения радиальной силы P_r по мере врезания режущей части инструмента в заготовку (i — порядковый номер элементарного режущего профиля при отсчете по винтовой линии, рис. 2, а).

Исходные данные для метчиков

Поле допуска гайки TD_2	Метчик	ΔTd_2 , мкм	ΔP , мкм	$\Delta\alpha/2$, мин (°)	f_p , мкм	f_{α} , мкм
4G, 5G, 6H	M12H2	40	± 9	± 20	16	13
7H, 8H	M12H4	80	± 45	± 20	78	13

Диаграмма (рис. 2, б) показывает удельный вес приращения радиальной силы от составляющих погрешностей ΔTd_2 , ΔP , $\Delta\alpha/2$, определенный при врезании третьего по счету $i = 3$ элементарного режущего профиля на расчетную толщину среза a_z .

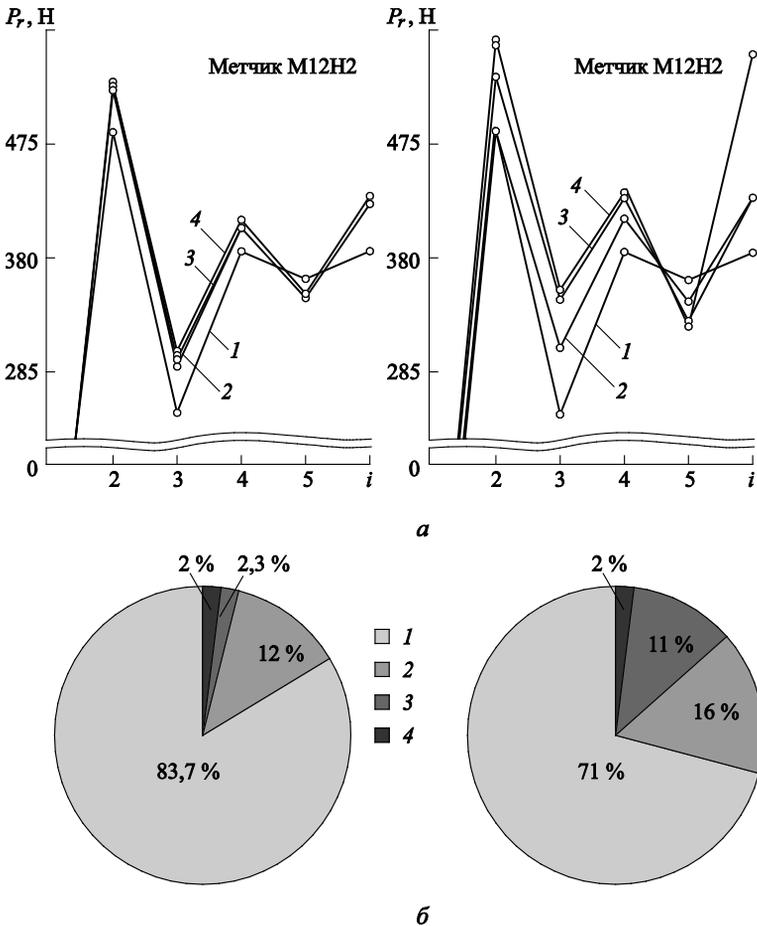


Рис. 2. Графики (а) и диаграммы (б) зависимости радиальной силы P_r от установленных допусков на резьбовой профиль метчиков (обрабатываемый материал — сталь 45, $z = 3$, $\varphi = 20^\circ$, $P = 1,75$ мм):

зависимости радиальной силы P_r , полученные для: 1 — номинального резьбового профиля метчика; 2 — наибольшего предельного контура инструмента; 3 — наибольшего предельного контура с учетом предельного отклонения шага резьбы ΔP ; 4 — наибольшего предельного контура с учетом предельных отклонений шага ΔP и половины угла профиля $\Delta\alpha/2$

Установлено, что при переходе в расчете от номинального контура резьбовой пары метчик — гайка к расчетам по предельному контуру резьбового профиля (для метчиков M12) наблюдается увеличение радиальной составляющей силы резания P_r на 17...30 % (40...100 Н), в зависимости от класса точности изготовления инструмента.

Экспериментальное определение радиальных сил P_r представляет известные трудности, поэтому при оценке их влияния на величину разбивки полагаем, что оно будет подобно влиянию тангенциальной составляющей силы резания P_z . В работе [7] для резьбонарезных головок с круглыми гребенками, работающими так же, как и метчики, по генераторной схеме, получены уравнения регрессии, характеризующие взаимосвязь между рассеянием тангенциальной составляющей силы резания ΔP_z и рассеянием среднего диаметра нарезаемых резьб ΔD_2 :

$$\Delta D_2 = 27 + 0,44\Delta P_z, \text{ для } P = 2 \text{ мм}, P = 3 \text{ мм}. \quad (3)$$

Согласно уравнению (3), изменение силы резания в пределах 40...100 Н может привести к увеличению разбивки на 17...44 мкм, что составляет примерно десятую долю поля допуска гайки M12-5H и четверть поля допуска гайки M12-7H (рис. 3).

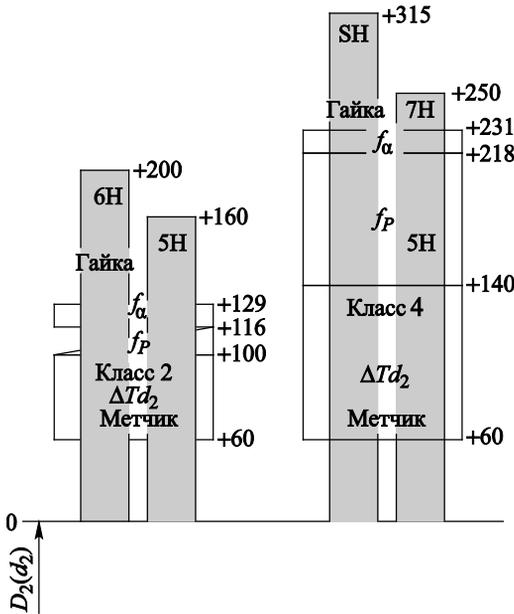


Рис. 3. Схемы полей допусков резьбовой пары метчик — гайка M12

Возможность расчета по действительному контуру позволяет анализировать меру влияния каждой из составляющих погрешностей изготовления резьбового профиля режущей части инструмента на динамику резьбонарезания.

За 100 % принято значение P_r , полученное для производящего диаметра — наибольшего предельного контура метчика с учетом регламентируемых стандартом предельных значений ΔP и $\Delta\alpha/2$. Диаграммы и графики (см. рис. 2) показывают, что для метчиков всех классов точности наибольший удельный вес имеет составляющая радиальной силы от погрешности собственно среднего диаметра резьбы ΔTd_2 (12...16 %), при этом доля ΔTd_2 в допуске на средний диаметр ΔTD_2 гаек М12-5Н, М12-7Н составляет 25...30 % (см. рис. 3). Для 2-го класса точности метчиков изменение радиальной силы, связанное с погрешностью шага ΔP и половиной угла профиля $\Delta\alpha/2$, незначительно (2,0...2,3 %); для 4-го класса наблюдается примерно равное влияние погрешности шага резьбы ΔP (11 %) и погрешности собственно среднего диаметра ΔTd_2 (16 %) инструмента на величину P_r , а суммарная доля ΔTd_2 и диаметральной компенсации накопленной погрешности шага f_p в допуске ΔTD_2 на средний диаметр гайки М12-7Н существенна и достигает 63 %. Подобные закономерности силовых характеристик сохраняются при нарезании всего параметрического ряда метрических резьб, за исключением резьб с мелким шагом ($P = 0,2...0,4$ мм), метчиками 1–3-го классов точности, где вследствие установленного увеличенного допуска на половину угла профиля ($\Delta\alpha/2 = \pm(50 - 70)$ [мин]) удельный вес составляющей P_r от погрешности половины угла профиля $\Delta\alpha/2$ увеличивается примерно вдвое и достигает 5 %.

Поскольку результаты расчетов получены с допущением, что составляющие погрешности изготовления режущей части инструмента входят в результат своими наибольшими предельными значениями и при определении производящего среднего диаметра суммируются алгебраически, то с точностью, достаточной для инженерных расчетов, определение параметров сечения срезаемого слоя и динамических характеристик при нарезании резьб метчиками 1–3-го классов точности можно проводить для номинального профиля резьбы, при нарезании резьб метчиками 4-го класса точности следует учитывать допуск собственно среднего диаметра ΔTd_2 , а при крупном шаге ($P = 4...6$ мм) — и накопленную погрешность шага ΔP .

Выводы. Установлена взаимосвязь между динамическими характеристиками формирования резьбы и допусками на основные формообразующие элементы режущей части резьбового профиля инструмента, работающего по генераторной схеме резания. Расчет динамических характеристик по действительному контуру резьбового профиля инструмента позволяет анализировать меру влияния составляющих погрешностей изготовления режущей части на динамику резьбонарезания и определять приоритеты технических мероприятий, направленных на повышение точности и стабильности процесса нарезания резьб.

Получена аналитическая зависимость радиальной силы и погрешностей режущего профиля инструмента, которую можно использовать при конструировании и нормировании точности изготовления формообразующих элементов резбонарезного инструмента, реализующего генераторную схему резания.

ЛИТЕРАТУРА

- [1] Матвеев В.В. *Нарезание точных резьб*. Москва, Машиностроение, 1978, 85 с.
- [2] Ананьев А.С., Серов В.П. Математическая модель процесса нарезания резьбы метчиком. *Технология машиностроения*, 2008, № 4, с. 67–68.
- [3] Иванина И.В. Имитационная модель резбонарезания по генераторной схеме. *Вестник МГТУ им. Н.Э. Баумана. Сер. Машиностроение*, 2002, № 4, с. 56–68.
- [4] Иванина И.В. Влияние угла в плане и углового шага между зубьями на плавность работы резбонарезного инструмента при генераторной схеме резания. *Известия высших учебных заведений. Машиностроение*, 2004, № 10, с. 56–63.
- [5] Иванина И.В. Влияние параметров режущей части метчика на точность нарезания резьбы. *Измерительная техника*, 2005, № 10, с. 38–41.
- [6] Добрянський С.С. Визначення сил різання при нарізуванні різьб головками. *Вісник Національного технічного університету України «Київський політехнічний інститут»*, Серія: *Машинобудування*, 2012, № 66, с. 17–20.
- [7] Добрянський С.С. Сили і точність при нарізуванні різьб головками. *Вісник Національного технічного університету України «Київський політехнічний інститут»*, Серія: *Машинобудування*, 2012, № 66, с. 43–46.
- [8] Ананьев А.С., Землянский М.С. Влияние угла заборного конуса метчика на силу резания и несущую способность опорных кромок профиля резьбы. *Известия Волгоградского государственного технического университета*, 2010, т. 6, № 12 (72), с. 6–7.
- [9] Ананьев А.С., Серов В.П. Влияние числа перьев на точность нарезаемой резьбы. *Обработка металлов (технология, оборудование, инструменты)*, 2008, № 3, с. 24–25.
- [10] Марков А.М., Лебедев П.В. Определение величины крутящего момента при нарезании внутренней резьбы в высокопрочных композиционных полимерных материалах. *Обработка металлов*, 2011, № 1, с. 8–11.
- [11] Древаль А.Е. Усилия резания при резбонарезании метчиком. *Известия высших учебных заведений. Машиностроение*. 1970, № 9, с. 174–178.

Статья поступила в редакцию 08.04.2016

Ссылку на эту статью просим оформлять следующим образом:

Иванина И.В. Влияние погрешностей формообразующих элементов метчиков на радиальную силу. *Инженерный журнал: наука и инновации*, 2017, вып. 3.
<http://dx.doi.org/10.18698/2308-6033-2017-3-1586>

Иванина Ирина Владимировна — канд. техн. наук, доцент кафедры «Метрология, взаимозаменяемость и сертификация» МГТУ им. Н.Э. Баумана. Область научных интересов: метрология, взаимозаменяемость, эксплуатационные и точностные характеристики нарезания резьб. Автор более 10 научных публикаций.
e-mail: i-ivanina@yandex.ru

Effect of manufacturing imprecision in tap surface-shaping points on the radial force

© I.V. Ivanina

Bauman Moscow State Technical University, Moscow, 105005, Russia

The article presents an analytical description of the threaded coupling between the tool and the workpiece as a complex geometric object characterised by specific manufacturing precision. We analyse the extent to which components of manufacturing imprecision in the tool cutting edge affect thread cutting dynamics. The study shows that the radial force component that depends on the effective thread diameter deviation proper is the most significant one for taps of all tolerance classes. We consider the possibility of computing dynamic properties based on the actual thread profile outline, to be used at the design stage for standardising manufacturing precision of surface-shaping points of the threading tool implementing a nibbling cutting pattern.

Keywords: thread cutting, nibbling cutting pattern, tap, tolerance, error, precision, chip parameters, radial force

REFERENCES

- [1] Matveev V.V. *Narezanie tochnykh rezb* [Precision thread cutting]. Moscow, Mashinostroenie Publ., 1978, 85 p.
- [2] Anan'ev A.S., Serov V.P. *Tekhnologiya mashinostroeniya — Journal "Tekhnologiya mashinostroeniya"* [Mechanical engineering technology], 2008, no. 4, pp. 67–68.
- [3] Ivanina I.V. *Vestnik MGTU im.N.E. Baumana. Ser. Mashinostroenie — Herald of the Bauman Moscow State Technical University. Ser. Mechanical Engineering*, 2002, no. 4, pp. 56–68.
- [4] Ivanina I.V. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedeniy. Mashinostroenie — Proceedings of Higher Educational Institutions. Machine Building*, 2004, no. 10, pp. 56–63.
- [5] Ivanina I.V. *Izmeritelnaya tekhnika — Measurement Techniques*, 2005, no. 10, pp. 38–41.
- [6] Dobryanskiy S.S. *Visnik Natsionalnogo tekhnichnogo universitetu Ukraini "Kiiivskiy politekhnichniy institute", Seriya Mashinobuduvannya — Journal of Mechanical Engineering, the National Technical University of Ukraine "Kyiv Polytechnic Institute"*, 2012, no. 66, pp. 17–20.
- [7] Dobryanskiy S.S. *Visnik Natsionalnogo tekhnichnogo universitetu Ukraini "Kiiivskiy politekhnichniy institute", Seriya Mashinobuduvannya — Journal of Mechanical Engineering, the National Technical University of Ukraine "Kyiv Polytechnic Institute"*, 2012, no. 66, pp. 43–46.
- [8] Ananyev A.S., Zemlyanskiy M.S. *Izvestiya Volgogradskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta — Scientific journal "Izvestia VSTU"*, 2010, vol. 6, no. 12 (72), pp. 6–7.
- [9] Ananyev A.S., Serov V.P. *Obrabotka metallov (tekhnologiya, oborudovanie, instrumenty) — Metal working and material science*, 2008, no. 3, pp. 24–25.
- [10] Markov A.M., Lebedev P.V. *Obrabotka metallov (tekhnologiya, oborudovanie, instrumenty) — Metal working and material science*, 2011, no. 1, pp. 8–11.

- [11] Dreval A.E. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedeniy. Mashinostroenie — Proceedings of Higher Educational Institutions. Machine Building*, 1970, no. 9, pp. 174–178.

Ivanina I.V., Cand. Sc. (Eng.), Assoc. Professor, Bauman Moscow State Technical University. Specialises in metrology, interchangeability, performance and precision parameters of thread cutting. e-mail: i-ivanina@yandex.ru