

И. А. Рябенков, канд. техн. наук, Харьков, Украина

ОБОСНОВАНИЕ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ВОЗМОЖНОСТЕЙ УМЕНЬШЕНИЯ ШЕРОХОВАТОСТИ ПОВЕРХНОСТИ ПРИ ОБРАБОТКЕ СВОБОДНЫМ И СВЯЗАННЫМ АБРАЗИВОМ

Получены аналитические зависимости для определения шероховатости поверхности при обработке свободным и связанным абразивом с позиции теории вероятностей упрощенным методом расчета. Показано, что разновысотное расположение зерен на рабочей поверхности круга существенно ограничивает возможности достижения требуемой шероховатости поверхности при шлифовании по сравнению с обработкой свободным абразивом. Основными условиями уменьшения шероховатости поверхности при шлифовании являются уменьшение зернистости круга, создание на круге примерно одновысотного расположения зерен, наклеивание на рабочую поверхность круга слоя абразивного порошка небольшой зернистости.

Ключевые слова: обработка свободным абразивом, шлифование, шероховатость поверхности, одновысотное расположение зерен, зернистость круга, режим резания

Отримано аналітичні залежності для визначення шорсткості поверхні при обробці вільним і зв'язаним абразивом з позиції теорії ймовірностей спрощеним методом розрахунку. Показано, що різновисотне розташування зерен на робочій поверхні круга суттєво обмежує можливості досягнення необхідної шорсткості поверхні при шлифуванні порівняно з обробкою вільним абразивом. Основними умовами зменшення шорсткості поверхні при шлифуванні є зменшення зернистості круга, створення на кругі приблизно одновисотного розташування зерен, наклеювання на робочу поверхню круга шару абразивного порошку невеликої зернистості.

Ключові слова: обробка вільним абразивом, шлифування, шорсткість поверхні, одновисотне розташування зерен, зернистість круга, режим різання

Analytical dependence for determining the surface roughness of the processing of free and bound abrasive with the position of the theory of probability a simplified method of calculation. It is shown that the location of different height grains on the working surface of a circle substantially limits the ability to achieve the required surface roughness when grinding as compared to treatment with free abrasive. The main terms of reducing the surface roughness is a reduction in grinding grain circle, creating the circle around the location odnovysotnogo grains sticking to the working surface of the circle a little abrasive powder grain layer.

Keywords: free abrasive machining, grinding, surface roughness, odnovysotnoe location grains, grain range, cutting mode

Постановка проблемы. Обеспечение высококачественной обработки деталей машин является важнейшим условием создания конкурентоспособной машиностроительной продукции. Как известно, параметры качества и точности обрабатываемых поверхностей деталей формируются на финишных операциях абразивной обработки, осуществляемых методами обработки свободным и связанным абразивом. Наибольшими технологическими возможностями с точки зрения обеспечения качества обработки располагает обработка свободным абразивом. Поэтому

операціям обробки вільним абразивом (доводка, полірування і т.д.) завжди передують операції обробки зв'язаним абразивом (шліфування, хонінгування, сулперфінішування і т.д.), оскільки лише на цих операціях можна досягти високих показателів якості обробки, наприклад, шерохватість поверхні на рівні $R_a \leq 0,05$ мкм. Разом з тим, операції обробки вільним абразивом характеризуються найбільшою трудомісткістю, зменшити яку можна головним чином шляхом переходу на обробку зв'язаним абразивом. Однак для цього необхідно забезпечити такі ж показателі якості обробки, як і при обробці вільним абразивом. В деяких випадках це вдається, наприклад, досягти при шліфуванні шерохватість поверхні на рівні $R_a = 0,05-0,1$ мкм і виключити з технологічного процесу обробку вільним абразивом, що різко знижує трудомісткість обробки. Однак в більшості випадків шліфування гарантовано не забезпечує таких високих показателів якості обробки, тому доводиться застосовувати трудомістку обробку вільним абразивом. В зв'язі з цим, актуально рішення задачі з'ясування технологічних можливостей підвищення якості обробки при шліфуванні і в особливості зменшення шерохватості поверхні до рівня $R_a = 0,05$ мкм і менше.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Питанням дослідження шерохватості поверхні при абразивній обробці в науково-технічній літературі приділено велику увагу [1-4]. Розроблені ефективні технологічні процеси обробки вільним і зв'язаним абразивом і практичні рекомендації по їх застосуванню. Розроблені методи аналітичного визначення параметрів шерохватості поверхні, що дозволяє науково обґрунтовано підійти до вибору оптимальних умов обробки, забезпечують необхідну шерохватість поверхні. Їх застосування дозволяє вирішити актуальну задачу зменшення шерохватості поверхні при шліфуванні до рівня, досяжного при обробці вільним абразивом, з метою зниження трудомісткості обробки. Тому в роботі вирішується задача аналізу технологічних можливостей обробки вільним і зв'язаним абразивом з точки зору зменшення шерохватості поверхні при шліфуванні. В основу роботи покладені результати теоретичних досліджень шерохватості поверхні, наведені в роботах [1-3].

Мета роботи – обґрунтування умов зменшення шерохватості поверхні при шліфуванні до рівня, досяжного при обробці вільним абразивом, для зниження трудомісткості обробки.

Основний матеріал. В роботі [5] встановлено, що при одношаровому розташуванні абразивних зерен на робочій поверхні алмазно-

абразивного інструмента, т.е. при доводке, на оброблюваної поверхності в процесі різання утворюється шерохуватий шар, який математично може бути описаний ймовірнісною функцією – відносної опорної довжини мікропрофілю обробленої поверхності

$$\Phi(y) = e^{-\frac{2 \cdot \operatorname{tg} \gamma \cdot n}{B} \cdot y}, \quad (1)$$

де 2γ – кут при вершині конусообразного режущого зерна; n – суммарне число абразивних зерен, що беруть участь у формуванні шерохуватості оброблюваної поверхності; B – ширина обробки, м; y – координата, відраховувана від вершини режущого зерна, м.

По фізическій суті ймовірнісна функція $\Phi(y)$ визначає частку неснятого матеріалу в шерохуватому шарі обробленої поверхності по координаті y . Як видно, з збільшенням y функція $\Phi(y)$ зменшується і при умові $y = R_{max}$ приймає значення, близьке до нуля, де R_{max} – максимальна висота мікронервностей обробленої поверхності (стандартний параметр шерохуватості поверхності), м.

При умові $y=0$ функція $\Phi(y=0)=1$, т.е. на цьому рівні весь матеріал не снят абразивними зернами. При умові $y = R_{max}$ функція $\Phi(y=R_{max}) = \Phi_0$, де Φ_0 може приймати значення, рівні 0,1; 0,05; 0,01 і менше, оскільки функція $\Phi(y)$ є ймовірнісною і не може бути рівною нулю. Тоді, потенціруючи залежність (1), з урахуванням $y = R_{max}$ і $\Phi(y = R_{max}) = \Phi_0$ отримано:

$$R_{max} = -\frac{\ln \Phi_0 \cdot B}{2 \cdot \operatorname{tg} \gamma \cdot n}. \quad (2)$$

В залежності (2) функція $\ln \Phi_0$ від'ємна, а параметр шерохуватості поверхності R_{max} приймає додатні значення.

Як видно, зменшити R_{max} можна головним чином за рахунок збільшення суммарного числа абразивних зерен, що беруть участь у формуванні шерохуватості оброблюваної поверхності $n = k \cdot B \cdot l$, де k – поверхнева концентрація зерен на робочій поверхності круга, шт./м²; l – довжина робочої частини інструмента, що беруть участь у формуванні шерохуватості оброблюваної поверхності, м.

Після перетворення залежність (2) приймає вигляд:

$$R_{max} = -\frac{\ln \Phi_0}{2 \cdot \text{tg} \gamma \cdot k \cdot l}. \quad (3)$$

Исходя из зависимости (3), уменьшить R_{max} можно увеличением двух параметров – k и l .

В работе [5] также установлено, что в случае разновысотного расположения абразивных зерен на рабочей поверхности алмазно-абразивного инструмента (а это имеет место при шлифовании), вероятностная функция $\Phi(y)$ описывается следующей зависимостью

$$\Phi(y) = e^{-\frac{2 \cdot \text{tg} \gamma \cdot n}{B} \frac{y^2}{2b}}, \quad (4)$$

где b – максимальная высота выступания вершин зерен над уровнем связки инструмента (шлифовального круга), м.

Потенцируя зависимость (4), с учетом $y = R_{max}$ и $\Phi(y = R_{max}) = \Phi_0$ получено:

$$R_{max} = \sqrt{-\frac{\ln \Phi_0 \cdot B \cdot b}{\text{tg} \gamma \cdot n}}. \quad (5)$$

Как видно, зависимость (5) принципиально отличается от аналогичной зависимости (2). Это связано с наличием в ней параметра b , который может изменяться в широких пределах, вызывая увеличение параметра шероховатости поверхности R_{max} .

Для количественной оценки значений параметра R_{max} , полученных при одновысотном и разновысотном расположении абразивных зерен на рабочей поверхности алмазно-абразивного инструмента, обозначим в зависимости (2) параметр $R_{max} = R_{max1}$, а в зависимости (5) – $R_{max} = R_{max2}$. Представляя

зависимость (2) в виде $-\frac{\ln \Phi_0 \cdot B}{\text{tg} \gamma \cdot n} = 2 \cdot R_{max1}$, и подставляя ее в

зависимость (5), получено:

$$R_{max2} = \sqrt{2 \cdot R_{max1} \cdot b}. \quad (6)$$

В табл. 1 и на рис. 1 приведены рассчитанные на основе зависимости (6) значения R_{max2} для разных значений R_{max1} и b .

Таблиця 1 – Расчетные значения R_{max2} (в мкм)

R_{max1} , мкм	0,05	0,1	0,5	1,0	1,5	2,0
R_{max2} (для $b=2$ мкм)	0,447	0,632	1,414	2,0	2,5	2,828
R_{max2} (для $b=5$ мкм)	0,707	1,0	2,236	3,162	3,878	4,472
R_{max2} (для $b=10$ мкм)	1,0	1,414	3,162	4,472	5,477	6,328
R_{max2} (для $b=20$ мкм)	1,141	2,0	4,472	6,325	7,746	8,944

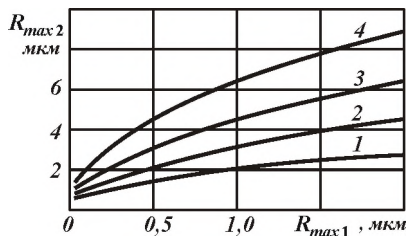


Рисунок 1 – Зависимость параметр шероховатости поверхности R_{max2} от R_{max1} :
 1 – $b=2$ мкм; 2 – $b=5$ мкм; 3 – $b=10$ мкм; 4 – $b=20$ мкм

Из табл. 1 следует, что параметр шероховатости поверхности R_{max2} принимает значения, значительно превышающие значения R_{max1} . Этим объясняется то, что при шлифовании в связи с разновысотным расположением зерен на рабочей поверхности шлифовального круга параметр шероховатости поверхности R_{max2} принимает весьма большие значения, несоизмеримые со значениями R_{max1} , достигаемыми в процессе доводки (обработки свободным абразивом) при одних и тех же значениях параметров n и B . Поэтому основным путем уменьшения R_{max2} следует рассматривать уменьшение разновысотного расположения зерен на рабочей поверхности шлифовального круга, т.е. уменьшения параметра $b \rightarrow 0$. Это достигается созданием на рабочей поверхности круга плосковершинных зерен за счет их затупления алмазным правящим карандашом [6]. Обеспечить фактически одновысотное расположение зерен можно электрогальваническим осаждением абразивных или алмазных зерен на рабочую поверхность круга. Уменьшить параметр b можно также изготовлением абразивных или алмазных кругов из зерен одного размера и т.д.

Разновысотное участие абразивных зерен в резании может быть обусловлено как разновысотным расположением зерен на рабочей

поверхности инструмента, так и режимом обработки. Например, при одновысотном расположении зерен на рабочей поверхности инструмента и в условиях доводки с радиальной подачей происходит разновысотное участие $n = k \cdot B \cdot V_{инстр} \cdot \tau = k \cdot B \cdot V_{инстр} \cdot R_{max1} / S$ абразивных зерен в резании, где $V_{инстр}$ – скорость перемещения алмазно-абразивного инструмента, м/с; S – скорость радиальной подачи, м/с; τ – время, в течение которого происходит радиальная подача на величину R_{max1} .

Подставляя параметр $n = k \cdot B \cdot V_{инстр} \cdot R_{max1} / S$ в зависимость (2), получено

$$R_{max1} = \sqrt{-\frac{\ln \Phi_0 \cdot S}{2 \cdot \text{tg} \gamma \cdot k \cdot V_{инстр}}}. \quad (7)$$

В этом случае разновысотное участие абразивных зерен в резании определяется отношением $S/V_{инстр}$: чем оно больше, тем больше R_{max1} . Поэтому уменьшить R_{max1} можно уменьшением отношения $S/V_{инстр}$ за счет уменьшения S или увеличения $V_{инстр}$.

Как видно, в процессе доводки имеет место разновысотное участие абразивных зерен в резании, что приводит к увеличению параметра шероховатости поверхности R_{max1} . Основным условием уменьшения R_{max1} следует рассматривать осуществление процесса доводки без радиальной подачи за счет создания начального натяга в технологической системе и применения процесса выхаживания. Очевидно, осуществление доводки с радиальной подачей (по жесткой или упругой схемам) увеличивает параметр шероховатости поверхности R_{max1} в соответствии с зависимостью (7).

Сравнивая аналогичные зависимости (3) и (7), видно, что в случае разновысотного расположения зерен на рабочей поверхности инструмента за счет увеличения параметра l при доводке проще добиться требуемой шероховатости поверхности, чем в случае разновысотного участия абразивных зерен в резании, где шероховатость поверхности определяется отношением $S/V_{инстр}$. Следовательно, применение радиальной подачи при доводке ограничивает возможности уменьшения шероховатости поверхности, т.е. доводку необходимо производить без радиальной подачи, например, реализуя упругую схему с заданным начальным натягом в технологической системе (схему выхаживания). Это позволит в максимальной степени использовать потенциальные возможности процесса доводки в плане достижения требуемой шероховатости поверхности.

К еще большему увеличению параметра шероховатости поверхности R_{max2} приводит осуществление процесса шлифования с радиальной подачей. В этом случае количество зерен, участвующих в формировании шероховатости поверхности определяется зависимостью $n = k \cdot B \cdot V_{кр} \cdot R_{max2} / V_{дет}$ (рис. 2), где $V_{кр}$, $V_{дет}$ – скорости круга и детали, м/с. Подставляя это выражение в зависимость (5), имеем

$$R_{max2} = \sqrt{\frac{\ln \Phi_0 \cdot b \cdot V_{дет}}{\operatorname{tg} \gamma \cdot k \cdot V_{кр} \cdot R_{max2}}} \quad (8)$$

Откуда

$$R_{max2} = \sqrt[3]{\frac{\ln \Phi_0 \cdot b \cdot V_{дет}}{\operatorname{tg} \gamma \cdot k \cdot V_{кр}}} \quad (9)$$

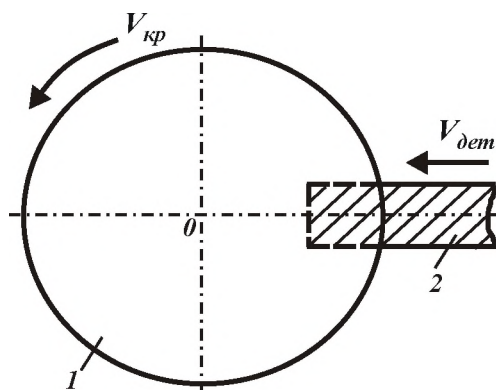


Рисунок 2 – Расчетная схема процесса шлифования:
1 – круг; 2 – деталь

В этом случае разновысотное участие абразивных зерен в резании определяется отношением $V_{дет} / V_{кр}$: чем оно больше, тем больше R_{max2} . Уменьшить параметр шероховатости поверхности R_{max2} можно, прежде всего, уменьшением радиальной подачи S . Наиболее просто это осуществить в условиях шлифования по упругой схеме с заданным радиальным усилием. Это обеспечивает минимальные значения S и соответственно минимальные значения параметра шероховатости поверхности R_{max2} .

С учетом известных соотношений [7]: $b = (1 - \varepsilon) \cdot \bar{X}$; $k = \frac{3 \cdot m \cdot (1 - \varepsilon)}{200 \cdot \pi \cdot \bar{X}^2}$

зависимость (9) примет вид:

$$R_{max} = \bar{X} \cdot \sqrt[3]{\frac{200 \cdot \pi \cdot \ln \Phi_0 \cdot V_{дет}}{3 \cdot \text{tg} \gamma \cdot m \cdot V_{кр}}}, \quad (10)$$

где \bar{X} – зернистость круга, м; m – объемная концентрация зерен круга (для 100%-й концентрации алмазного круга – $m=100$); $(1 - \varepsilon)$ – безразмерная величина, определяющая степень выступания режущих зерен над уровнем связки круга, изменяется в пределах 0...0,5.

Исходя из зависимости (10), уменьшить параметр шероховатости поверхности R_{max2} при шлифовании можно главным образом за счет уменьшения зернистости круга \bar{X} , а также за счет уменьшения $V_{дет}$ и увеличения m и $V_{кр}$.

Как показывает практика, изготовление шлифовального круга с весьма малой зернистостью (например, алмазного круга зернистостью 5/3) вызывает значительные технические сложности. Поэтому и реализация значений параметра шероховатости поверхности на уровне $R_{max} = 0,1$ мкм при шлифовании фактически невозможна. В этих условиях эффективно применение обработки свободным абразивом, о чем свидетельствуют результаты расчетов, приведенные в табл. 1, согласно которым можно гарантированно обеспечить высокие показатели шероховатости поверхности. Основным условием применения процесса шлифования с целью уменьшения шероховатости поверхности следует рассматривать притупление вершин абразивных зерен и установление их примерно одновысотного выступания над уровнем связки круга. Учитывая то, что шлифование, как правило, осуществляется с поперечной подачей, параметр шероховатости поверхности R_{max2} в этом случае будет определяться зависимостью (7), которая в отличие от зависимости (9) приводит к меньшей шероховатости поверхности.

Таким образом, основным условием уменьшения шероховатости поверхности при шлифовании является снижение разновысотного расположения зерен на рабочей поверхности круга. Одним из эффективных решений в этом направлении следует рассматривать наклеивание на рабочую поверхность круга слоя абразивного порошка небольшой зернистости или же увеличение площади контакта шлифовального круга с обрабатываемой поверхностью $B \cdot l$ (например, при обработке отверстий), что позволит существенно увеличить количество одновременно работающих зерен $n = k \cdot B \cdot l$, участвующих в формировании шероховатости поверхности.

Необходимо отметить, что аналогичные зависимости для определения параметров шероховатости поверхности были получены в работе [3] другими методами расчета. Это указывает на их достоверность. Принимая значение $\Phi_0=0,001$, имеем $\ln\Phi_0=-4,6$. После подстановки этого значения в (10) получена зависимость

$$R_{max} = \bar{X} \cdot \sqrt[3]{\frac{307 \cdot \pi \cdot V_{dem}}{tg\gamma \cdot m \cdot V_{кр}}}, \quad (11)$$

которая отличается от аналогичной зависимости, приведенной в работе [3], лишь множителем, равным 1,13. Следовательно, предложенный в настоящей работе подход к определению параметра шероховатости поверхности R_{max} позволяет существенно упростить расчеты и получить зависимости, аналогичные известным зависимостям, что открывает новые возможности анализа и оптимизации условий абразивной обработки по критерию наименьшей шероховатости поверхности.

Полученные теоретические решения использованы при разработке эффективных финишных операций абразивной обработки. Установлено, что применение мелкозернистых абразивных кругов, обладающих повышенной режущей способностью, позволяет в ряде случаев уменьшить шероховатость поверхности до уровня $R_a=0,05$ мкм и произвести замену трудоемкой обработки свободным абразивом.

Выводы. В работе получены аналитические зависимости для определения шероховатости поверхности при обработке свободным и связанным абразивом с позиции теории вероятностей упрощенным методом расчета. Теоретически показано, что разновысотное расположение зерен на рабочей поверхности круга существенно ограничивает возможности достижения требуемых показателей шероховатости поверхности при шлифовании по сравнению с процессами обработки свободным абразивом. Основными условиями уменьшения шероховатости поверхности при шлифовании являются уменьшение зернистости круга, создание на круге примерно одновысотного расположения зерен, наклеивание на рабочую поверхность круга слоя абразивного порошка небольшой зернистости, увеличение площади контакта шлифовального круга с обрабатываемой поверхностью. Показано, что добиться существенного уменьшения шероховатости поверхности при шлифовании за счет регулирования параметрами режима резания фактически невозможно в связи с ограниченностью пределов их изменения. Большими возможностями в этом плане располагает применение схемы шлифования с начальным натягом в технологической системе, т.е. схема выхаживания. Показано, что при обработке свободным абразивом с поперечной подачей эффективно

использовать упругую схему с фиксированной поперечной подачей, которая обеспечивает уменьшение шероховатости поверхности.

Список использованных источников: 1. *Королев А.В.* Теоретико-вероятностные основы абразивной обработки / *А.В. Королев, Ю.К. Новоселов.* – Саратов: Изд-во Саратов. ун-та, 1989. – 320 с. 2. *Евсеев Д. Г.* Физические основы процесса шлифования / *Д. Г. Евсеев, А. И. Сальников.* – Саратов: Изд-во Саратов. ун-та, 1978. – 128 с. 3. *Новиков Ф.В.* Физические и кинематические основы высокопроизводительного алмазного шлифования: автореф. дис. на соискание научн. степени докт. техн. наук: спец. 05.03.01 “Процессы механической обработки, станки и инструменты” / *Ф.В. Новиков.* – Одесса, 1995. – 36 с. 4. Качество поверхности при алмазно-абразивной обработке / *Э.В. Рыжов, А.А. Сагарда, В.Б. Ильицкий, И.Х. Ченовецкий.* – К.: Наук. думка, 1979. – 244 с. 5. *Новиков Ф.В.* Исследования шероховатости поверхности при алмазно-абразивной обработке методами теории вероятности / *Ф.В. Новиков, В.Г. Шкурупий* // Вісник НТУ “ХПІ”. – Х.: НТУ “ХПІ”, 2004. – № 44. – С. 140-149. 6. *Дитиненко С.А.* Повышение эффективности технологии финишной обработки цилиндрических поверхностей твердосплавных изделий: автореф. дис. на соискание научн. степени канд. техн. наук: спец. 05.02.08 “Технология машиностроения” / *С.А. Дитиненко.* – Харьков, 2005. – 20 с. 7. Алмазно-абразивная обработка материалов: справочник / Под ред. проф. *А.Н. Резникова.* – М.: Машиностроение, 1977. – 390 с.

Bibliography (transliterated): 1. *Korolev A.V.* Teoretiko-veroyatnostnye osnovy abrazivnoy obrabotki / *A.V. Korolev, Y.K. Novoselov.* – Saratov: Izd-vo Sarat. un-ta, 1989. – 320 s. 2. *Evseev D.G.* Fizicheskie osnovy protsesssa shlifovaniya / *D.G. Evseev, A.I. Salmikov.* – Saratov: Izd-vo Sarat. un-ta, 1978. – 128 s. 3. *Novikov F.V.* Fizicheskie i kinematicheskie osnovy vysokoproizvoditelnogo almaznogo shlifovaniya: avtoref. dis. ... dokt. tekhn. nauk: spets. 05.03.01 “Protsessy mekhanicheskoy obrabotki, stanki i instrumenty” / *F.V. Novikov.* – Odessa, 1995. – 36 s. 4. Kathestvo poverkhnosti pri almazno-abrazivnoy obrabotke / *E.V. Ryzhov, A.A. Sagarda, V.B. Ilitskiy, I.K. Thepovetskiy.* – Kiev: Nauk. dumka, 1979. – 244 s. 5. *Novikov F.V.* Issledovaniya sherokhovatosti poverkhnosti pri almazno-abrazivnoy obrabotke metodami teorii veroyatnosti / *F.V. Novikov, V.G. Shkurupiy* // Visnyk NTU “KPI”. – Kharkov: NTU “KPI”, 2004. – № 44. – S. 140-149. 6. *Ditinenko S.A.* Povyshenie effektivnosti tekhnologiyi finishnoy obrabotki tsilindricheskikh poverkhnostey tverdospлавnykh izdeliy: avtoref. diss. ... kand. tekhn. nauk: spets. 05.02.08 “Tekhnologiya mashinostroeniya” / *S.A. Ditinenko.* – Kharkov, 2005. – 20 s. 7. Almazno-abrazivnaya obrabotka materialov: spravothnik / Pod red. prof. *A.N. Reznikova.* – M.: Mashinostroenie, 1977. – 390 s.