

УДК 621.952.2

Производственные исследования качества поверхности и точности обработки глубокого отверстия в распределительном валу

Соловьёв А. И.^{1,*}, Джафарова Ш. И.¹

^{*}a-solovev@bk.ru

¹МГТУ им. Н.Э. Баумана, Москва, Россия

Проведено комплексное исследование по определению качественных и количественных показателей среднего арифметического отклонения профиля шероховатости поверхности Ra по длине глубокого отверстия распредвала автомобиля и наличие концентраторов напряжений, а также установлены закономерности изменения параметров точности по длине глубокого отверстия: Δr – отклонение размера, Δr_b – радиальное биение, отклонение формы в поперечном сечении $\Delta f_{\text{поп}}$ (Ск). Установлено, что на всей длине измеренных отверстий имеются задиры, риски и огранка. Они вызывают преждевременный выход из строя инструмента вследствие выкрашивания твердосплавных направляющих элементов, а в ряде случаев поломки режущей и калибрующей кромок. Выявлено превышение рекомендуемой величины зазора в соединении кондукторной втулки и диаметального размера калибрующей части сверла почти в 3 раза. Вскрыты причины и механизм появления концентраторов напряжений, даны технологические и конструкторские рекомендации, служащие достижению заданного качества и точности обработки глубокого отверстия.

Ключевые слова: глубокое отверстие, распределительный вал, сверление, инструмент одностороннего резания, геометрическая точность, копирование погрешности, отклонение размера, отклонение формы, радиальное биение, режимы резания

Для автомобильного производства характерно широкое использование специального оборудования, где заданная точность и качество обработки деталей должны обеспечиваться автоматически в течение длительного периода времени.

В этих условиях на передовых предприятиях автомобильной промышленности для обработки глубоких отверстий в коленчатом валу, шатуне и других деталях [1] применяют сверла одностороннего резания. Использование такого инструмента в цикле работы автоматической линии позволяет исключить промежуточную обработку зенкерованием и развертыванием, а это означает возможность сокращения полного цикла обработки отверстия, существенное повышение производительности труда [2, 3, 4].

Распределительный вал двигателя автомобиля – одна из ответственных деталей, которая постоянно находится под нагрузкой. В неработающем двигателе распредвал находится под воздействием сил, создаваемых пружинно-рычажными механизмами. В

работающем двигателе добавляются силы, связанные со скоростным и температурным режимами его работы, а также силы трения скольжения кулачковых поверхностей распределителя о поверхности рычагов газораспределительного механизма.

В условиях эксплуатации двигателей автомобилей «Жигули» периодически на заводе-изготовителе фиксировали отказы в работе двигателя по причине появления трещин на внешних и внутренних поверхностях распределительного вала. Установлено, что в ряде случаев трещины появлялись и росли начиная с поверхности глубокого отверстия (масляного канала) диаметром 15 мм и длиной 367,5 мм.

При рассмотренных нагрузках, имеющих разную природу их появления и воздействия на распределитель, трещины могут появляться в результате их роста при наличии концентраторов напряжений как на наружных, так и на внутренних поверхностях детали после их механической обработки.

Ранее подобные исследования проводились, но для деталей имеющих другие условия эксплуатации и изготовленные из других материалов [2, 3,4, 5, 6], поэтому проводимые в данной работе исследования являются актуальными.

Если наличие концентраторов напряжений на внешних поверхностях распределителя очевидно и их легко ликвидируют шлифованием и полированием [1], то причины появления подобных дефектов на поверхностях масляного канала диаметров 15 мм не выявлены и мероприятия по их устранению не разработаны.

Поэтому представляется актуальным интерес проведение комплексного исследования в условиях производства по решению задач определения качественных и количественных показателей среднего арифметического отклонения профиля (высотного параметра) шероховатости поверхности R_a по длине отверстия диаметром 15 мм и наличие концентраторов напряжений, а также определение закономерностей изменения параметров точности по длине глубокого отверстия: Δr – отклонение размера, Δr_b – радиальное биение, отклонение формы в поперечном сечении $\Delta_{\phi}^{поп}(S_k)$. Необходимо также определить состояние направляющего диаметра кондукторной втулки для направления инструмента и наружного диаметра режущей части сверла одностороннего резания с целью выработки рекомендаций по исключению появления концентраторов напряжений на поверхности отверстия и трещин в процессе эксплуатации распределителя.

Для проведения комплексного исследования было установлено, что заготовки распределительного вала автомобиля «Жигули» получены литьем по металлическим моделям при машинной формовке, отливки II класса точности из высокопрочного чугуна марки ВЧ 65-48-1. Структура материала определена по методике [7] и представляет собой по металлической основе (рис.1а): площадь, занятая перлитом, менее 2%; дискретность перлита – крупнопластинчатый более 1,6 мкм; по графиту (рис.1,б): площадь, занятая графитом от 8% до 12%; размер наибольшего диаметра включений графита от 60 мкм до 100 мкм; форма графитных включений шаровидная, неправильная. Твердость высокопрочного чугуна составила HB 265...285

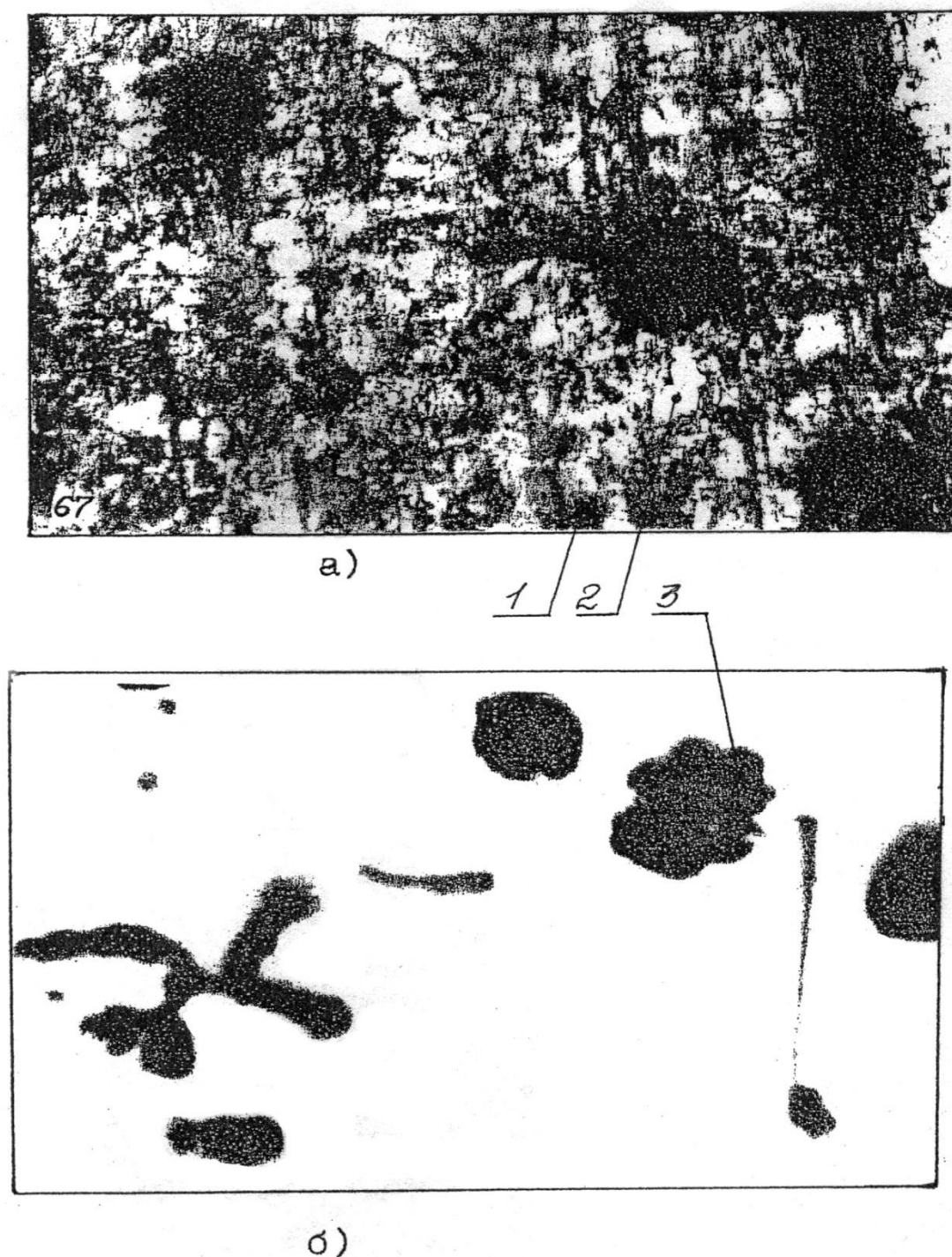


Рис.1. Микроструктура заготовок из высокопрочного чугуна марки ВЧ 65-48-1 по металлической основе (а) и графиту (б): 1 – перлит; 2 – феррит; 3 – графит (увеличение $\times 300$)

при следующем химическом составе: Fe– основа; Si – 0,97%; C– 2,72%; Mn – 0,48%; Cr– 0,05%; Ni – 2,55% и физико-механических свойствах: предел прочности на растяжение $\sigma_B = 65$ кгс/мм² ; предел прочности на изгиб $\sigma_{Bi} = 48$ кгс/мм² ; относительное удлинение $\delta = 1\%$ (по справочным данным).

С обоих концов вал 1 закреплен в двухкулачковых патронах 2 с самоцентрирующими призмами 3 (рис.2,б).

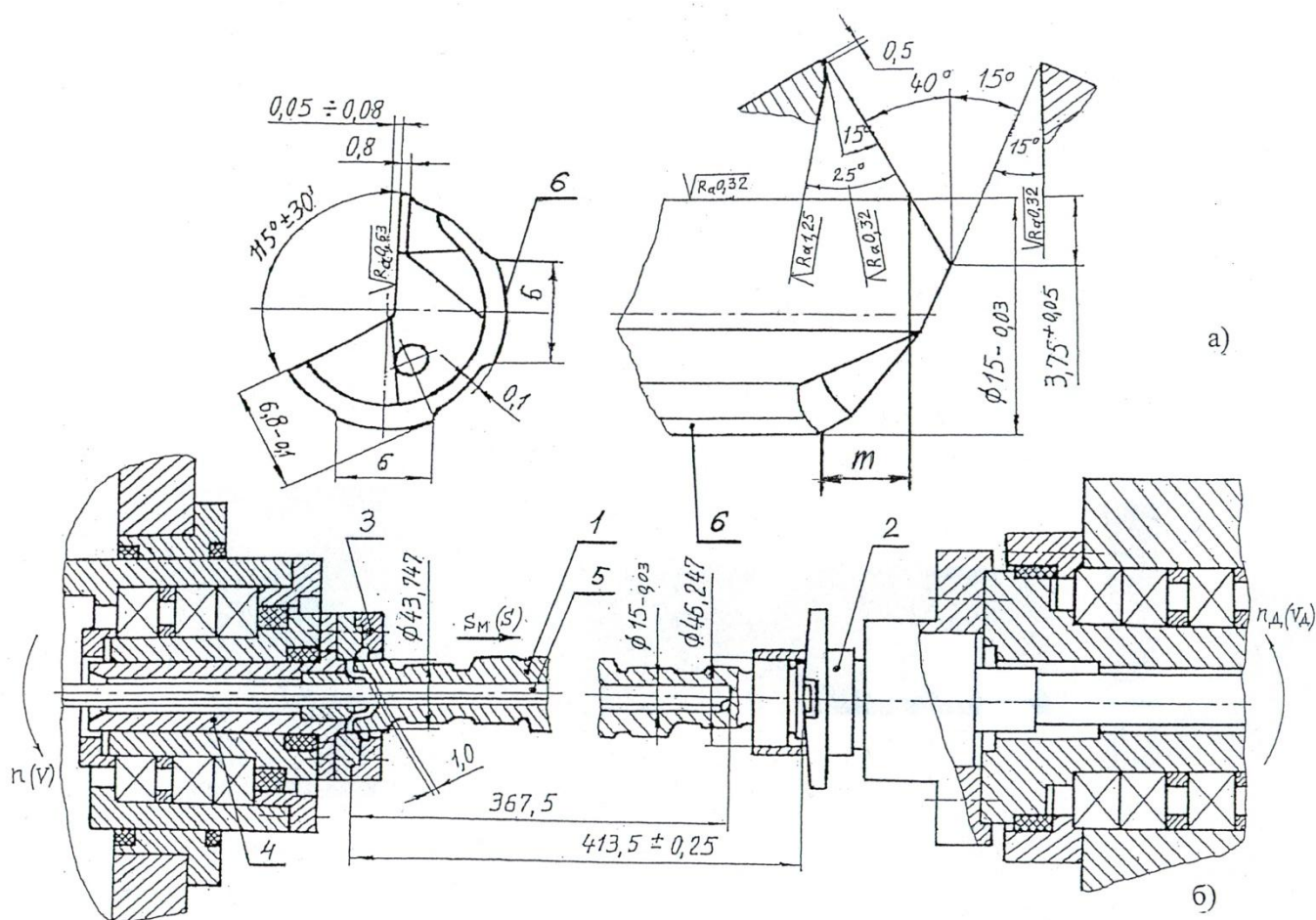


Рис. 2. Схема обработки а – геометрически параметры режущей части сверла одностороннего резания; б – схема сверления: 1 – распределительный вал; 2 – двухлачковый патрон; 3 – самоцентрирующие призмы; 4 – кондукторная втулка в сборе; 5 – сверло одностороннего резания; 6 – направляющие элементы

При обработке применяется сверло одностороннего резания 5 диаметром $15 - 0,03$ мм (рис.2,а) с рабочей частью из твердого сплава ВК 6. Сверло имеет общую длину 905 мм, один конец его закреплен в цанговом патроне, другой направляется кондукторной втулкой в сборе 4. В свою очередь кондукторная втулка в сборе состоит из втулки-держателя 1 (рис.3) и кондукторной втулки 2. Для улучшения динамических характеристик упругой системы станка [8], уменьшения вибрации в процессе обработки сверло слева поддерживает люнет. В процессе обработки вращается инструмент, а заготовка вместе с кондукторной втулкой вращается в противоположную сторону.

Исследования проведены на деталях, обработанных в составе автоматической линии на станке фирмы «Hüller» при режимах резания: частота вращения сверла $n = 832$ об/мин, детали $n_d = 178$ об/мин, скорость резания $V = 48$ м/мин, подача инструмента $S_m = 132$ мм/мин, $S_o = 0,13$ мм/об (рис.4), давление $P \approx 6,86$ МПа и расход смазочно-охлаждающей жидкости $Q \approx 40$ л/мин (по справочным данным) [2, 5].

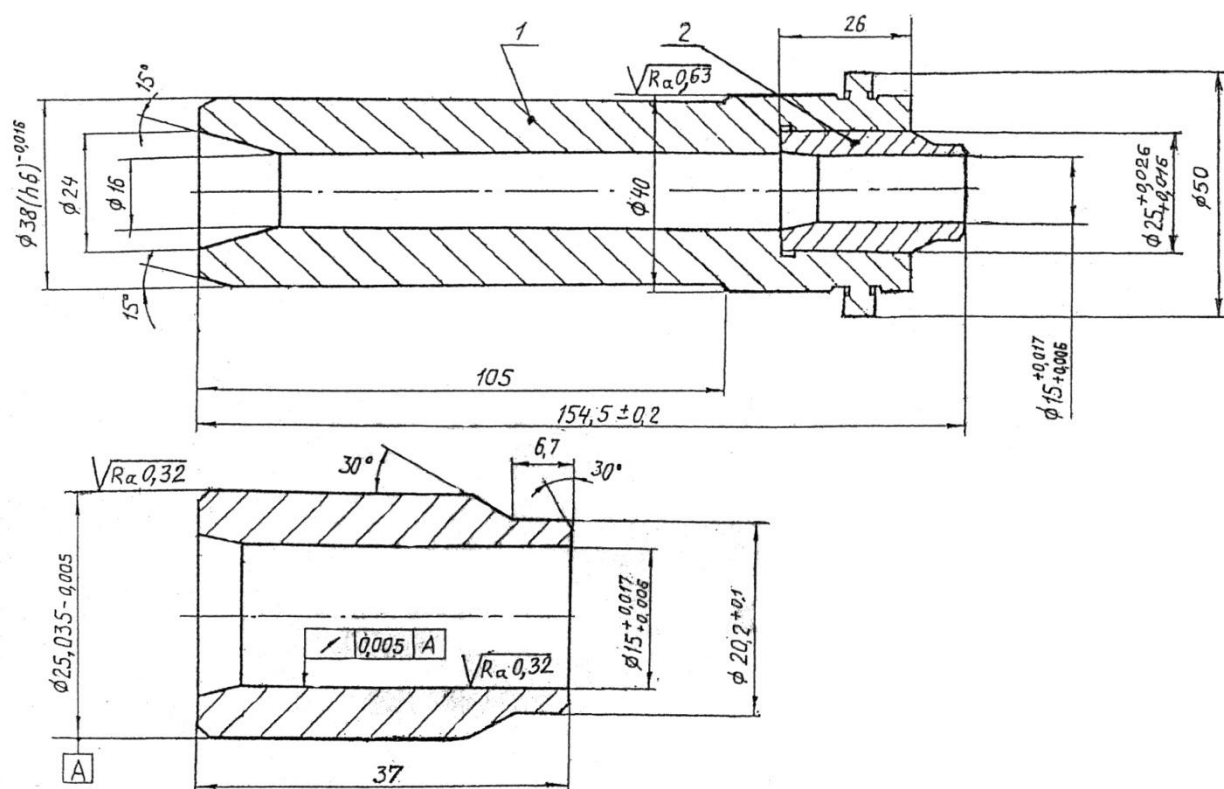


Рис. 3. Кондукторная трубка в сборе: 1 – втулка-держатель (сталь 19ХГН); 2 – втулка кондукторная (твердый сплав ВК15)

Шероховатость поверхности отверстия R_a , полученного сверлением, а также отклонения его расположения $\Delta_{рб}$ и формы $\Delta_{\phi}^{поп}$ (Ск) определяли при базировании частей распредвала соответствующими его шейками на призмы. Для проведения измерений валы были разрезаны, и контроль проводили на частях вала с 1-ой, 3-ей и 5-ой шейками, находящимися в отверстии на расстоянии 50, 200 и 350 мм от левого торца вала (рис.2,б).

Измерения шероховатости поверхности R_a проведены на приборе «Bendiks» на 55 образцах при среднем значении $R_a \text{ ср} = 2,6 \text{ мкм}$, максимальном $R_a \text{ max} = 4,9 \text{ мкм}$ и минимальном $R_a \text{ min} = 1,1 \text{ мкм}$. До 40% отверстий валов имеют показания R_a в интервале 1,5...2,3 мкм.

Важно отметить, что на 53% образцов отмечено наличие задиров и рисок глубиной от 0,01мм до 0,15 мм, которые могут служить концентраторами напряжений. А в процессе эксплуатации эти дефекты могут способствовать росту трещин в толще высокопрочного чугуна распредвала.

Появление задиров и рисок в отверстии могут быть связаны с условиями эксплуатации и состоянием наружного диаметра режущей части сверла одностороннего резания и направляющего диаметра кондукторной втулки для направления инструмента [3]. Соответствующие измерения предусмотрены в данных комплексных исследованиях.

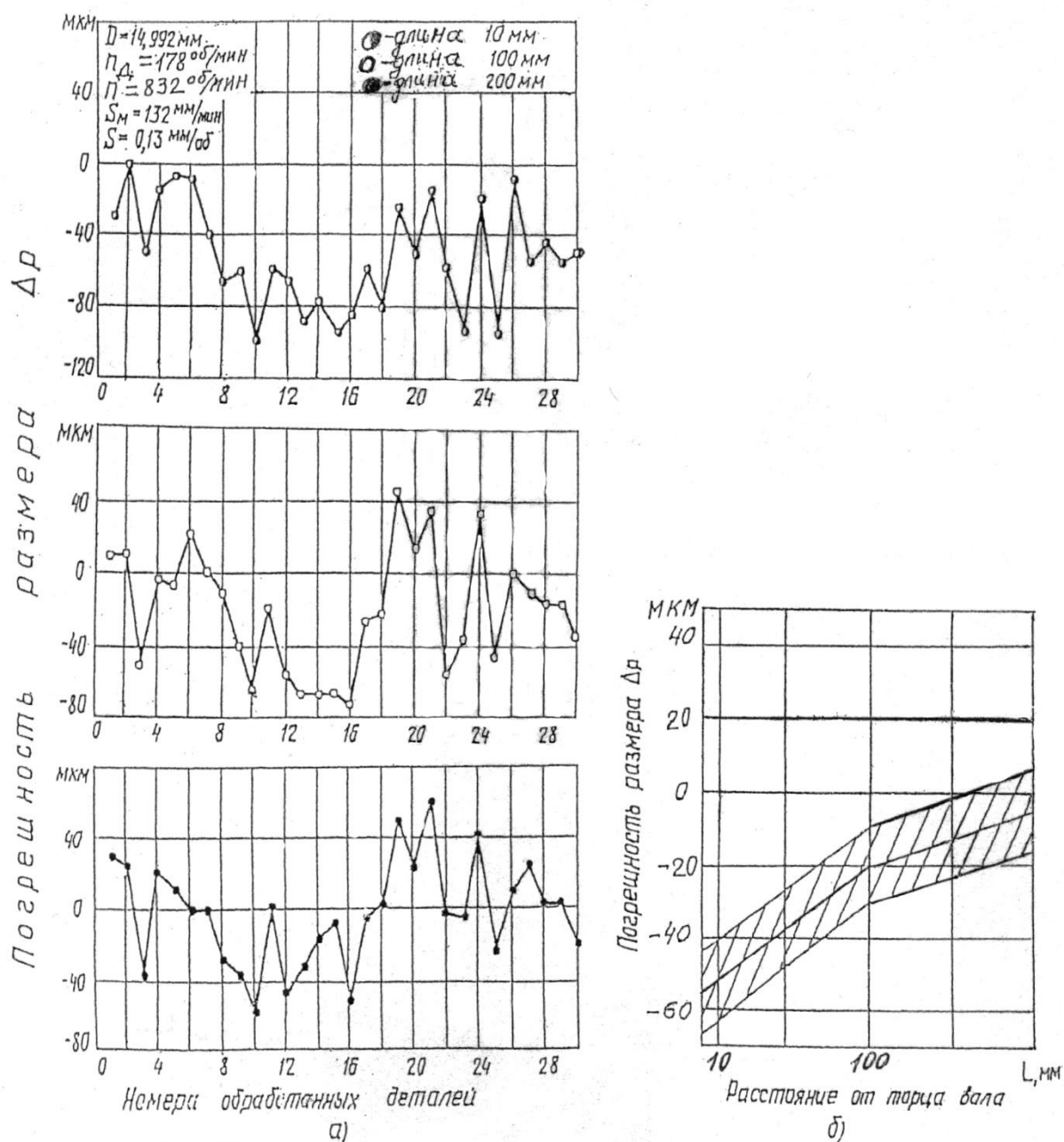
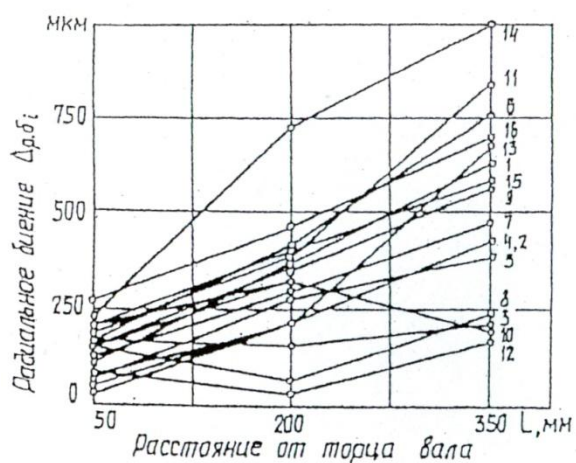
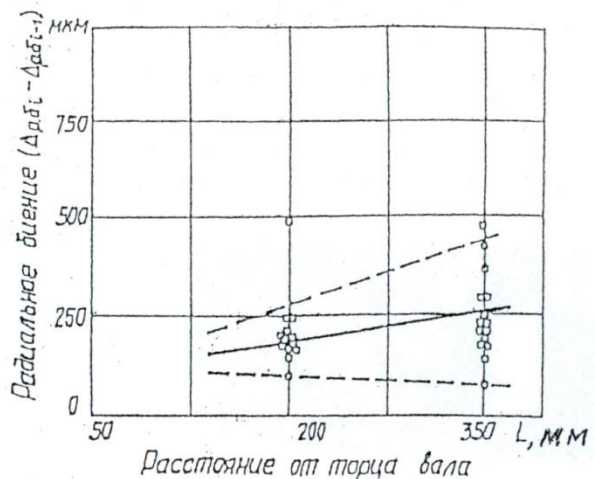


Рис.4. Изменение погрешности размера Δr отверстия при обработке на автоматической линии «Hüller»: а) точечные диаграммы; б) по длине отверстия

Однако, заметим что на этих же разрезанных частях распредела проведены измерения Δr_b - радиального биения и отклонения формы в поперечном сечении $\Delta f^{\text{поп}}$ (Ск). Отклонение определяли с помощью индикатора часового типа с ценой деления 0,01 мм. Реализация случайной функции $\Delta r_b = f(L)$ по 16-ти измеренным деталям приведена на рис. 5,а (Δr_b – радиальное биение отверстия относительно поверхности соответствующей шейки, L — расстояние контролируемого сечения от торца по длине вала).



а)



б)

Рис.5. Изменение величины радиального биения Δp_b : а) по длине отверстия; б) рост величины $\Delta p_{b_i} - \Delta p_{b_{i-1}}$

В проведенных экспериментах достаточно четко видна общая тенденция: по мере роста длины отверстия L - отклонение Δp_b увеличивается. Лишь на 4 участках из 32 наблюдается уменьшение отклонения. Изменение отклонения на длине 150 мм для разных участков и деталей неодинаково. На участке $L = 50 \dots 200$ мм в среднем отклонение увеличивается на 180 мкм, на участке $L = 200 \dots 350$ мм, $\Delta p_{b_i} - \Delta p_{b_{i-1}} = 250$ мкм, причем на втором участке повышается степень влияния случайных факторов (рис.5,б), поэтому здесь наблюдается увеличение рассеяния значений отклонений.

При этих же условиях проведены измерения профиля отверстия через каждые 30° по 12-ти точкам. Это позволило провести анализ изменения спектра амплитуд (C_k) гармонических составляющих погрешности формы отверстия в поперечном сечении $\Delta \phi_{\text{поп}}$ по первым шести гармоническим составляющим.

Таким образом установлено, что на всей длине измеренных отверстий имеется огранка. На параметры огранки существенное влияние оказывают [2] состояние и размеры калибрующей ленточки и величина размера m (рис.2,а) инструмента. Выявлено, что огранка на поверхности отверстия вызывает преждевременный выход из строя инструмента вследствие выкрашивания твердосплавных направляющих элементов, а в ряде случаев поломки режущей и калибрующей кромок. В связи с этим огранка нежелательна не только как дефект поверхности отверстия, но и как фактор существенно снижающий стойкость инструмента [2, 4, 9, 10].

Очевидно, что с увеличением длины сверления (рис.6) происходит рост амплитуд гармонических составляющих $C_1 \dots C_6$. При этом величина амплитуды C_1 в разы больше чем остальные $C_2 \dots C_6$, а также для неё характерно интенсивное явление копирования (увеличения). Так как на расстоянии 50 мм от торца вала $C_1 = 63$ мкм, на расстоянии 200 мм $C_1 = 150$ мкм, а на расстоянии 350 мм $C_1 = 258$ мкм (рис.6,а), это указывает на существенное отклонение оси отверстия (увод) от номинального (заданного) положения.

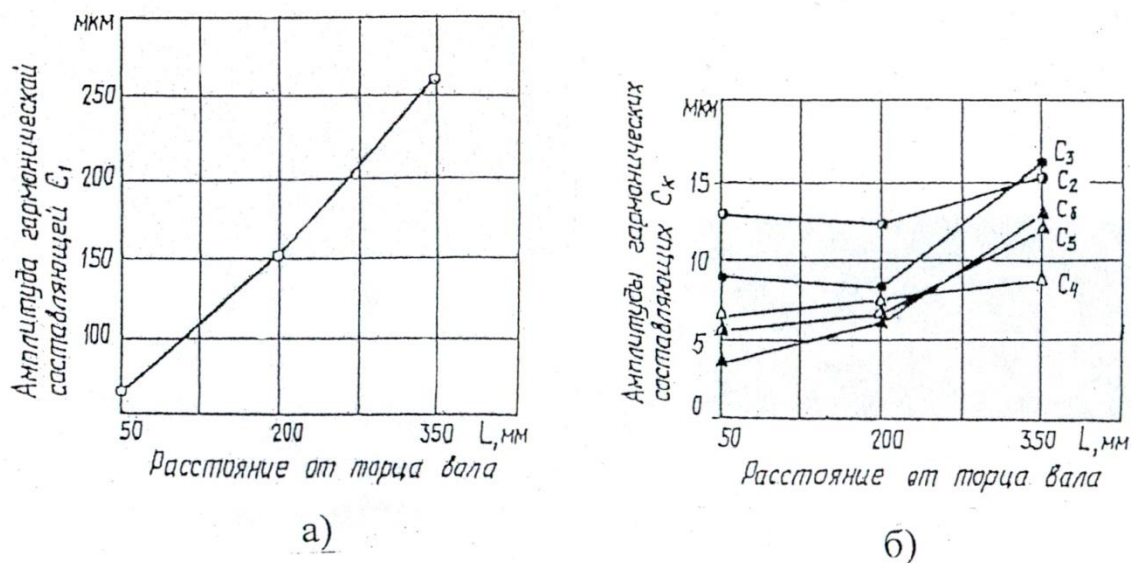


Рис. 6. Изменение величин амплитуд гармонических составляющих по длине отверстия: а) C_1 ; б) составляющих погрешности формы огранки в поперечном сечении $C_2 \dots C_6$.

Из остальных гармонических составляющих наибольший удельный вес в погрешность формы $\Delta_{\text{ф}}^{\text{поп}}$ вносят амплитуды C_2 и C_3 (от 8 до 16 мкм), амплитуды $C_4 \dots C_6$ от 3 до 12 мкм (рис.6,б) на различном расстоянии от торца вала. Качественно аналогичные зависимости наблюдались и при обработке образцов из серого чугуна [6].

Чтобы завершить комплекс исследований точности обработки глубокого отверстия распредвала фиксировали изменение диаметра отверстия и отклонение расположения его по длине на 30-ти неразрезанных валах. Размер отверстия измеряли на расстоянии 10, 100 и 200 мм от входа в отверстие с левого торца вала трехконтактным микрометрическим нутромером «Tessa» с ценой деления 0,005 мм. В указанных сечениях средние диаметры и рассеяние размера отверстия соответственно, $d_{\text{ср}} \pm 3\sigma$; 4.945 ± 0.096 ; 14.980 ± 0.102 ; 14.996 ± 0.093 (рис.4,б). Таким образом, с увеличением длины сверления наблюдается увеличение размера отверстия при практически одинаковом рассеивании.

Измерение погрешности размера отверстия кондукторной втулки (Δr вт) производили с использованием трехконтактного микрометрического нутромера «Tessa» с ценой деления 0,005 мм. Замеры сделаны в трех сечениях от левого торца втулки (рис.3) соответственно на длине 10, 20, 30 мм для 20 втулок.

Данные исследования показали, что наибольший износ направляющего диаметра отверстия втулок наблюдали на выходе инструмента из втулки. Это указывает на доминирующее влияние радиальной составляющей силы резания на явление износа при врезании инструмента в распредвал и базировании (рис.2,а) направляющих элементов инструмента на отверстие направляющей втулки. По техническим условиям наибольший диаметр отверстия втулки может составлять $D_{\text{max}}^{\text{ВТ}} = 15^{+0.017}$ мм, а величина $6\sigma = 0.011$ мм. В то же время замеры диаметров отверстий показали в сечениях $D_{\text{ср} 10}^{\text{ВТ}} = 15.025$

$\pm 0,052$ мм; $D_{cp\ 20}^{BT} = 15,025 \pm 0,054$ мм; $D_{cp\ 30}^{BT} = 15,029 \pm 0,054$ мм величины, существенно превосходят требования чертежа и условия эксплуатации кондукторных втулок.

В свою очередь представляет интерес состояние наружного диаметра режущей части сверла одностороннего резания (рис.2,а). По техническим условиям каждое сверло и кондукторная втулка должны отработать 100 циклов при длительности цикла 3,54 мин. Проведены замеры 30-ти сверл микрометром с ценой деления 0,005 мм, которые показали, что только 14% сверл удовлетворяли техническим условиям на выполнение данной операции при минимальном диаметре режущей части сверл $D_{min}^{CB} = 14,970$ мм. Средний диаметр составил $D_{cp}^{CB} = 14,938$ мм при $6\sigma = 0,14$ мкм.

Исходя из допусков на изготовления отверстия в направляющей втулке и размера диаметра калибрующей ленточки инструмента минимальный зазор в их соединении должен быть в пределах 0,006 мм, а максимальный 0,047 мм. Так как точность обрабатываемого в распредвале отверстия жестко не регламентируется допускается увеличение зазора до 0,055 мм [2].

Однако, в условиях действующего производства, эти величины достигают при врезании в заготовку 0,150 мм и превышают рекомендуемую величину зазора почти в 3 раза.

Это и является причиной большой величины амплитуды первой гармонической составляющей C_1 , указывающей на значительный и увеличивающийся увод оси отверстия по длине распредвала. А возрастающая по длине обрабатываемого отверстия огранка с амплитудами гармонических составляющих $C_2...C_6$ снижая стойкость инструмента [2] способствует износу направляющих элементов и калибрующей части инструмента. В свою очередь эти причины создают благоприятные условия для наростообразования на калибрующих и режущих частях инструмента [3], которые также способствуют появлению задиров и рисок на поверхности отверстия распредвала.

Таким образом установлены причины и механизм появления концентраторов напряжений и возможный их рост в толще материала в процессе эксплуатации распредвала.

Результаты исследований показывают, что количество циклов работы как направляющих втулок, так и сверл одностороннего резания назначаются необоснованно. Так как их механизм износа различен, должно быть различным и количество обрабатываемых ими циклов.

Контрольные результаты замеров показали, что наиболее рационально назначать при обработке для кондукторных втулок не более 80 циклов обработки отверстий и для сверл не более 63 циклов.

Необходимо ввести в содержание выполняемой технологической операции глубокого сверления обязательную периодическую проверку зазора в соединении отверстия кондукторной втулки и диаметрального размера калибрующей части сверла, который должен быть не более 0,055 мм.

Следует в обязательном порядке задать на чертеже и контролировать при изготовлении режущей части сверла (рис.2,а) размер $m = (2...3) \times S_0 = 0,26...0,39$ мм [3], который отсутствует на заводском чертеже. Он позволяет уменьшить величину отжатия

калибрующей части сверла от номинального положения, вибрации инструмента, увод оси и огранку отверстия распредвала.

Полученные результаты исследований и разработанные рекомендации могут быть распространены для проектирования аналогичных операций сверления, проектирования и внедрения в промышленность сверл одностороннего резания при обеспечении заданного качества и точности выпускаемой продукции.

Список литературы

1. Бурцев В.М., Васильев Ф.С., Деев О.М., Игнатов А.В., Кондаков А.И., Максимович Б.Д., Никадимов Е.Ф., Соловьев А.И., Тавров В.И., Тихонов В.П., Ястребова Н.А. Технология машиностроения: учебник для вузов. В 2 т. Т. 2. Производство машин / под ред. Г.Н. Мельникова. 3-е изд., испр. и перераб. М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2012. 551 с.
2. Уткин Н.Ф., Кижняев Ю.И., Плужников С.К., Шаманин А.А., Дроздов Ф.М., Немцев Б.А., Бычков Н.А., Борзов В.Ф. Обработка глубоких отверстий / под общ. ред. Н.Ф. Уткина. Кемерово: ГУ КузГТУ, 2006. 205 с.
3. Кожевников Д.В. Современная технология и инструмент для обработки глубоких отверстий: Обзор. М.: НИИмаш, 1981. 60 с.
4. Кирсанов С.В., Гречишников В.А., Григорьев С.Н., Схиртладзе А.Г. Обработка глубоких отверстий в машиностроении / под общ. ред. С.В. Кирсанова. М.: Машиностроение, 2010. 344 с.
5. Бузник Е.Н. Технология автотракторостроения. М.: Изд-во МГИУ, 2006. 97 с.
6. Соловьёв А.И., Джафарова Ш.И. [Сравнительное исследование точности отверстий в деталях из серого чугуна при вибросверлильной обработке \(часть 2\)](#) // Инженерный вестник. МГТУ им. Н.Э. Баумана. Электрон. журн. 2014. № 11. С. 122-131. Режим доступа: <http://engbul.bmstu.ru/doc/746818.html> (дата обращения 01.10.2015).
7. Мальцев В.М. Металлография промышленных цветных металлов и сплавов. М.: Книга по Требованию, 2012. 367 с.
8. Горелова А.Ю., Плешаков А.А., Кристаль М.Г. Методы повышения точности обработки глубоких отверстий // Известия Тульского Государственного Университета. Технические Науки. 2013. № 7-2. С. 363-370.
9. Агафонов В.В. Определение погрешностей обработки с учетом динамических характеристик упругой системы станка // СТИН. 2006. № 5. С. 10-13.
10. Маркарьян Ю.А. Управление процессом глубокого сверления // СТИН. 2007. № 6. С. 5-7.

Manufacturing Research of Surface Quality and Working Deep Hole Accuracy in the Camshaft

A.I. Solov'ev^{1,*}, Sh.I. Djafarova¹

^{*}a-solovev@bk.ru

¹Bauman Moscow State Technical University, Moscow, Russia

Keywords: deep hole, camshaft, tool one-sided cut, geometric accuracy, copying errors, the deviation of size, geometric tolerance, radial runout, the cutting

Study of surface quality and machining accuracy of a deep hole in the camshaft in manufacturing environment is conducted to make recommendations to eliminate emerging stress concentrators on the hole surface after machining and arising cracks while the engine is in operation.

So it is important to conduct a comprehensive task-driven study to determine qualitative and quantitative values of arithmetical mean deviation of the surface roughness profile (parameter of height) and available stress concentrators, as well as to define regularities of changing accuracy parameters for deep-hole length such as deviation size, radial run-out, and geometric tolerance in cross section. A guide diameter of the drill bushing and an outer diameter of the cutting part of one-sided cut have been determined too.

A camshaft casting from ductile iron HF 65-48-1 was processed in the automatic line on the machine "Hüller" by a drill with the cutting head from the hard alloy VK6 with simultaneously rotating workpiece and tool. The drill was guided through drill bushing from solid alloy VK 15.

The measurement results showed that in 53% of samples there were tears and scratches up to 0.15 mm in depth, which could serve as stress concentrators and in the process of operation encourage growth of cracks in the bulk of the camshaft material.

A significantly increasing value of the radial run-out size and all six studied harmonic components show that there is a deviation of the hole axis (run) from the nominal (specified) position and faceting available with their copied (increased) values along the entire length of the hole. This is a qualitative confirmation that in processing the holes in parts made from grey cast iron, there is a mechanism of copying errors earlier available.

It is found that the size of a clearance between guide diameter of drill bushing and diameter of tool gage ribbon makes 0.150 mm and almost 3 times exceeds the recommended value.

All this reduces resistance, promotes a wear of the guide elements and a gauge part of the tool. In turn, these reasons create favorable conditions for built-up edge on calibrating and cutting parts of the one-sided cuts which contribute to tears and scratches on the surface of the camshaft hole.

Thus, the causes and the mechanism of appearing stress concentrators and their possible growth in the bulk of the material during camshaft operation have been defined.

As the wear mechanisms of guide bushing of various drill bits are different, it is advised to settle no more than 80 processing cycles for bushing and at most 63 cycles for drills.

The technological operation content on deep drilling to be made has to contain a mandatory checking of the diametral clearance between the drill bushing hole and the calibrating part of the drill, which must be of 0.055 mm at most.

It is recommended to introduce a drill size $m=0.26\text{--}0.39$ mm in its working drawing because it is unavailable there. It allows to reduce deviation of drill cutting part from the nominal position, tool vibration, run of axis and faceting the camshaft holes.

The elaborated recommendations can be used in the development of similar drilling operations.

References

1. Burtsev V.M., Vasil'ev F.S., Deev O.M., Ignatov A.V., Kondakov A.I., Maksimovich B.D., Nikadimov E.F., Solov'ev A.I., Tavrov V.I., Tikhonov V.P., Yastrebova N.A. *Tekhnologiya mashinostroeniya: uchebnik dlya vuzov. V 2 t. T. 2. Proizvodstvo mashin* [Manufacturing engineering. In 2 vols. Vol. 2. Production of machines]. Moscow, Bauman MSTU Publ., 2012. 551 p. (in Russian).
2. Utkin N.F., Kizhnyaev Yu.I., Pluzhnikov S.K., Shamanin A.A., Drozdov F.M., Nemtsev B.A., Bychkov N.A., Borzov V.F. *Obrabotka glubokikh otverstii* [Treatment of deep holes]. Kemerovo, KuzSTU Publ., 2006. 205 p. (in Russian).
3. Kozhevnikov D.V. *Sovremennaya tekhnologiya i instrument dlya obrabotki glubokikh otverstii: Obzor* [Modern technology and tool for processing deep holes: Overview]. Moscow, NIIMASH Publ., 1981. 60 p. (in Russian).
4. Kirsanov S.V., Grechishnikov V.A., Grigor'ev S.N., Skhirtladze A.G. *Obrabotka glubokikh otverstii v mashinostroenii* [Processing of deep holes in mechanical engineering]. Moscow, Mashinostroyeniye Publ., 2010. 344 p. (in Russian).
5. Buznik E.N. *Tekhnologiya avtotraktorostroeniya* [The technology of tractor production]. Moscow, Moscow State Industrial University Publ., 2006. 97 p. (in Russian).
6. Solov'ev A.I., Dzhaferova Sh.I. Comparative study of the accuracy of holes in detail made of gray cast iron at drilling processing (pt. 2). *Inzhenernyi vestnik MGTU im. N.E. Baumana = Engineering Herald of the Bauman MSTU*, 2014, no. 11, pp. 122-131. Available at: <http://engbul.bmstu.ru/doc/746818.html>, accessed 01.10.2015. (in Russian).
7. Mal'tsev V.M. *Metallografiya promyshlennykh tsvetnykh metallov i splavov* [Metallography of industrial nonferrous metals and alloys]. Moscow, Kniga po Trebovaniyu Publ., 2012. 367 p. (in Russian).
8. Gorelova A.Yu., Pleshakov A.A., Kristal' M.G. Methods to improve the accuracy of processing of deep holes. *Izvestiya Tul'skogo Gosudarstvennogo Universiteta. Tekhnicheskie Nauki = Journal Tula State University. Technical Science*, 2013, no. 7-2, pp. 363-370. (in Russian).
9. Agafonov V.V. Definition of error processing taking into account dynamic characteristics of the elastic system of the machine. *STIN*, 2006, no. 5, pp. 10-13. (in Russian).
10. Markar'yan Yu.A. Control of deep drilling processes. *STIN*, 2007, no. 6, pp. 5-7. (English version of journal: *Russian Engineering Research*, 2007, vol. 27, iss. 9, pp. 631-633. DOI: [10.3103/S1068798X07090122](https://doi.org/10.3103/S1068798X07090122)).