

УДК 621.91.01

DOI:10.30987/2223-4608-2021-3-26-31

Л.Л. Сафарова, аспирант, А.С. Ямников, д.т.н.

(Тульский государственный университет, 300012, г. Тула, пр. Ленина, 92)

E-mail: yamnikovas@mail.ru

Научное обоснование технологии изготовления цилиндра дизеля ТМЗ-450Д

Представлен анализ комплексной технологии механической обработки цилиндров дизеля ТМЗ-450Д. Отмечено, что заготовка, имеет неоднородность структуры и поэтому нуждается в старении. Доказано, что жесткость оборудования в действующем технологическом процессе недостаточна для компенсации наследственных погрешностей заготовки. Предложено и внедрено новое оборудование высокой жесткости.

Ключевые слова: погрешность формы и положения; технологическая наследственность; жесткость; точность.

L.L. Safarova, post graduate student, A.S. Yamnikov, Dr. Sc. Tech.

(Tula State University, 92, Lenin Avenue, Tula, 300012)

Scientific substantiation of technology for manufacturing cylinder of TMZ-450D diesel engine

The analysis of complex technology for TMZ-450D diesel cylinder machining is presented. It is emphasized that a billet has a heterogeneous structure and that is why it is in need of ageing. It is proved that equipment rigidity in an acting engineering process is insufficient for the compensation of billet hereditary defects. New equipment with high rigidity is offered and introduced.

Keywords: error of form and position; technological heredity; rigidity; accuracy.

В дизеле ТМЗ-450Д [1] одной из самых ответственных деталей является «цилиндр» (рис. 1). Заготовка – отливка. Точность отливки 11-0-0-16 ГОСТ Р 53464-2009. Деталь имеет цилиндрическую форму, на внешней поверхности которой 10 ребер. Внутренняя поверхность представляет собой зеркало цилиндра и требует обработку высокой точности. От качества изготовления данной поверхности зависит дальнейшая работа двигателя, а конкретно такие показатели как износостойкость цилиндров ДВС и поршневых колец, расход масла, а также долговечность ДВС.

К готовой детали предъявляются высокие требования по точности формы и размера: отклонение от цилиндричности не более 0,005 мм, допуск диаметра $\varnothing 95+0,03$ мм. Требование к качеству поверхности типовые для дизельных двигателей: на зеркальной поверхности цилиндра ($Rz = 0,2...0,7$ мкм) наносят редкую сетку диагональных перекрестных смазочных впадин по глубине ($Rz = 2...6$ мкм), задаваемой и контролируемой по диаграмме

Аббота [2].

Технологический процесс изготовления детали разработан для условий серийного производства и ориентирован на сравнительно большой объем выпуска продукции:

1. Цилиндр выполнен из специального износостойкого чугуна, методом литья в оболочковые формы. Данный материал применяют только для изготовления цилиндров. Необходима предварительная термообработка – искусственное старение отливки (твердость 207...241 НВ).

2. Цилиндр имеет ребра для отвода тепла, выделяющегося при работе дизеля. На верхнем торце цилиндра имеется прилив, на котором маркируется его размерная группа.

3. Зеркало цилиндра требует высокой точности обработки (рис. 2).

По заводским данным 80 % деталей выполнены в пределах допусков по всем размерам зеркала цилиндра: отклонения от цилиндричности до 8 мкм; изменение размеров готовой детали без старения достигает 3...10 мкм.

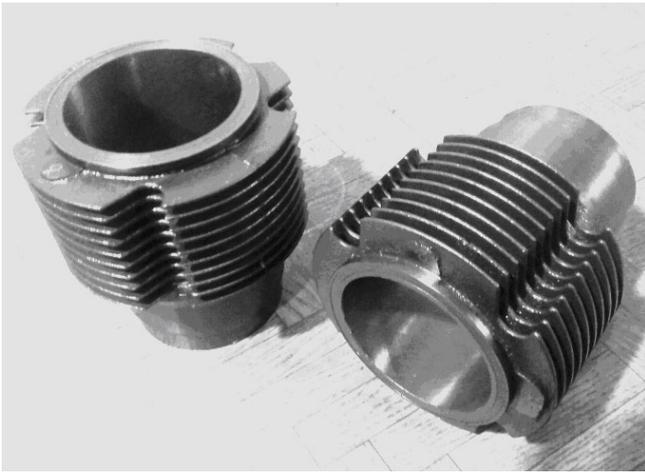


Рис. 1. Деталь «Цилиндр»

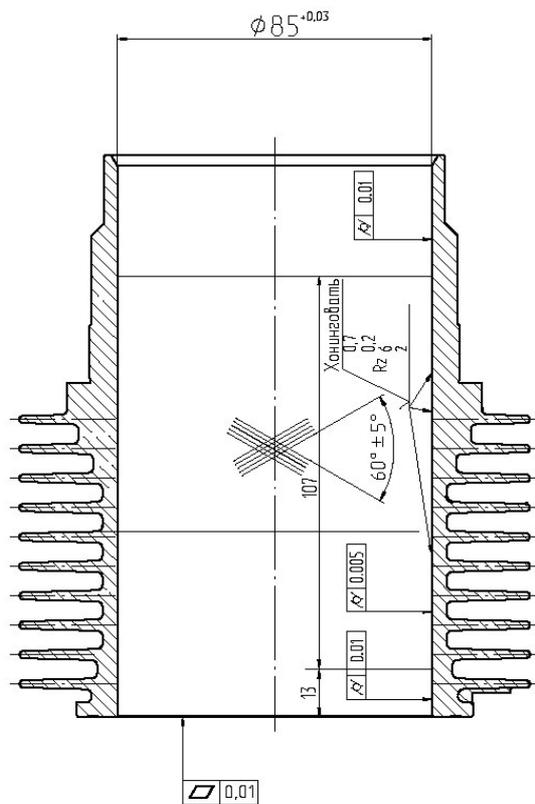


Рис. 2. Чертеж детали «Цилиндр»

Необходимость усовершенствования технологического процесса изготовления «цилиндра» в условиях серийного производства заключается в том, что в дизельном производстве возникла проблема получения заданной точности внутренней поверхности «цилиндра», а именно соответствие параметров шероховатости диаграмме Аббота. Причем увеличение времени предварительного и окончательного хонингования не улучшает показателей по геометрической точности, а в некото-

рых случаях даже ухудшает их. Допуски на отклонения поверхности зеркала от цилиндричности составляют до 0,01 мкм.

При производстве цилиндров используют все классические рекомендации по технологии их изготовления, в частности стадийность выполнения операций: токарная с ЧПУ – старение – расточная – старение – хонинговальная – старение – хонинговальная – хонинговальная – старение. Однако значительная часть цилиндров бракуется по точности и по соответствию качества поверхности зеркала заданной диаграмме Аббота [2].

Отливки из чугуна имеют неоднородную плотность, вследствие его сложного состава и особенностей кристаллизации [3]. Данные, полученные на томографе, преобразованы в томограммы, из которых видно, что металл в отливке имеет неоднородную структуру, плотность которой колеблется в пределах 6,75...7,25 г/см³. Для сохранения эксплуатационных характеристик в технологии производства базовых деталей двигателя – цилиндров, изготавливаемых из специального цилиндрического чугуна, применяют особые приемы, включающие стадийность механической обработки резанием с последовательным удалением припуска и уточнением обрабатываемых поверхностей, а также различные варианты старения [3].

Отливки подвергают искусственному старению в шахтной электропечи, нагревая в течение 9-ти часов до температуры 490...510 °С, затем охлаждая в печи с открытой крышкой до температуры 380...400 °С, после чего – на воздухе. Производят контроль параметров микроструктуры и твердости образца, вырезанного из отливки, в лаборатории механических испытаний и металлографии с оформлением аттестата. Твердость образца 207...249 НВ. Окончательную точность и качество поверхности зеркала цилиндра традиционно обеспечивают хонингованием, которое является теплонапряженным процессом [4], поэтому требует дополнительного исследования влияния тепловых процессов на стабильность достигнутой точности во времени.

Для выявления путей совершенствования технологии был проведен пооперационный анализ причин появления брака. Установлено, что одной из основных причин является неоднородность плотности отливки и вызванные этим коробления формы цилиндра при старении. Усугубляло положение морально и физически устаревшего оборудования (табл. 1).

1. Перечень операций по обработке зеркала цилиндра дизельного двигателя

№ и название операции	Модель оборудования	Эскиз операции
005 Токарная с ЧПУ	Токарный станок с ЧПУ 16A20Ф3С39	
010 Расточная	Отделочно-расточный станок 1Р-ТС95, 1999 года выпуска	
015 – 020 Хонинговальная 2 операции чернового хонингования.	Вертикально-хонинговальный станок 3822ОП40	
025 – 035 Хонинговальная 025, 030 предварительное и чистовое хонингование. 035 – окончательное хонингование для достижения заданных параметров диаграммы Аббота.	Вертикально-хонинговальный станок СС-6062	

Закономерные копирования погрешностей оказывают влияние при смене технологических баз [3]. Так на первой операции растачивание главного отверстия производят при базировании по литой наружной цилиндрической поверхности. В соответствии с нормами отливки точностью 11-0-0-16 по

ГОСТ Р 53464–2009 допускают смещение стержня до 1,2 мм. Это вызывает колебание припуска на растачивание и разности в величине отжимов резца от обрабатываемой поверхности, определяемых по известной зависимости:

$$\Delta_{\text{дет}} = \frac{\Delta_{\text{заг}}}{j} \lambda C_p S^q, \quad (1)$$

где j – жесткость технологической системы, Н/м; λ – отношение радиальной составляющей силы резания к главной; C_p – постоянная главной составляющей силы резания для принятого соотношения обрабатываемого материала заготовки и режущего материала инструмента; S – подача инструмента на очередной рез (оборот заготовки), мм/об; q – степень влияния подачи на главную составляющую силы резания.

Часто отношение одноименных погрешностей заготовки и обработанной детали называют уточнением ε , определяемым преобразованием формулы (1) в зависимость:

$$\varepsilon = \frac{\Delta_{\text{заг}}}{\Delta_{\text{дет}}} = \frac{j}{\lambda C_p S^q} \quad (2)$$

Для расчета уточнения ε необходимо знать величины всех входящих в неё элементов. Жесткость оборудования можно определять экспериментально, но это требует специальной оснастки и длительного времени. Поэтому на практике обычно прибегают к вычислению жесткости через экспериментальное определение величины уточнения. Для этого на заготовке создают специально измеренную погрешность в виде перепада её размеров $\Delta_{\text{заг}}$. Затем настраивают станок на заданные технологическим процессом режимы обработки, выполняют обработку и измеряют получившуюся погрешность $\Delta_{\text{дет}}$. Тогда преобразованием зависимости (2) получают формулу для производственного определения жесткости технологической системы:

$$j = \frac{\varepsilon}{\lambda C_p S^q} \quad (3)$$

Формулу (3) используют для анализа влияния составляющих жесткость технологической системы. Для практических расчетов при анализе точности технологических процессов удобнее и проще пользоваться первой частью формулы (2) и собственно величиной производственного уточнения. В частности, для определения уточнения на операции растачивания, выполняемой на токарном станке с ЧПУ 16A20Ф3С39, был специально изготовлен образец со ступенчатым отверстием (рис. 3).

Вначале отверстие расточили напроход под диаметр D , затем проточили 3 канавки диаметром D' на расстояниях l_3, l_5, l_8 от базового торца. Настроили станок на заданные технологией режимы и проточили напроход с расчетным припуском. Замерили фактические значения размеров в продольном сечении: $D_3, D'_3, D_5, D'_5, D_8, D'_8$, на расстояниях l_3, l_5, l_8 от базового торца, данные также занесли в табл. 2.

По разнице диаметров нашли глубину канавки t_3, t_5, t_8 до растачивания по формуле

$t_i = 0,5(D'_i - D_i)$ и после растачивания – t'_3, t'_5, t'_8 , рассчитали уточнение $\varepsilon_i = t_i/t'_i$ и представили в табл. 2. Разность полученных значений объясняет систематическое уменьшение внутреннего диаметра отверстия по краям детали, наблюдаемое при черновом растачивании. С учетом возможного уточнения токарного станка на операции растачивания $\varepsilon_{\text{ТОК}} = 6$ [5], получают по формуле (1) погрешность положения оси отверстия: $\Delta_{\text{дет1}} = 0,2$ мм.

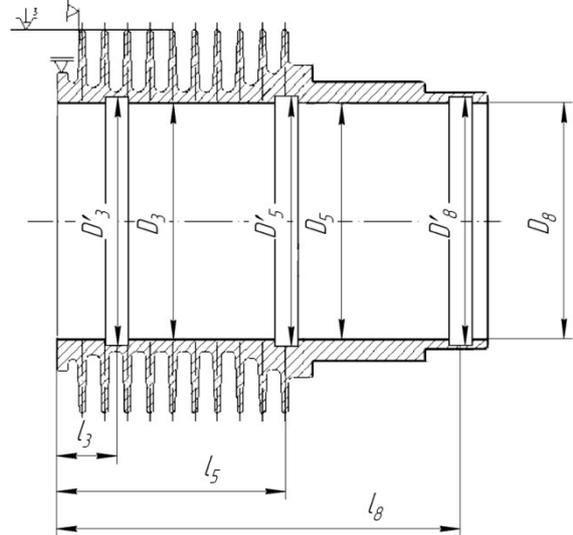


Рис. 3. Схема размеров образца для определения жесткости технологической системы токарного станка с ЧПУ 16A20Ф3С39

2. Фактические значения размеров ступенчатого отверстия до и после растачивания

Величина размера	D_3	D'_3	D_5	D'_5	D_8	D'_8
До растачивания	93,65	94,68	93,62	94,64	93,22	94,23
Глубина канавки t_i	0,515		0,51		0,505	
После растачивания	94,65	94,82	94,62	94,792	94,32	94,526
Глубина канавки t'_i	0,085		0,086		0,103	
Уточнение ε_i	6,06		5,93		4,9	

Одновременно, за одну установку на токарной операции с ЧПУ обрабатывают комплекс поверхностей, служащих в дальнейшем технологическими базами на операции растачивания, выполняемой на отделочно-расточном станке модели 1Р-ТС95, выпущенного в 1999 году (см. табл. 1). Экспериментальное определение уточнения технологической системы отделочно-расточного станка 1Р-ТС95, дало значения $\varepsilon = 4...5$. При таких значениях на хонингование поступят заготовки с колебанием размеров в сечении l_8 от базового торца порядка 0,05 мм, а по всей по-

верхности до 0,075 мм.

Из проведенного анализа действующего технологического процесса следует, что нужно повышать жесткость оборудования и стремиться к минимальному количеству смен технологических баз. Для выполнения этих условий для предварительного растачивания предложено применить токарный станок с ЧПУ ТНС-6008.

Для снижения деформации детали, а также для устранения влияния биения инструмента при обработке внутренней поверхности на токарном станке для базирования цилиндра по выступающим ребрам используют накладки на кулачки, выполненные из армированного текстолита, в виде трех одинаковых составных частей (рис. 4).



Рис. 4. Комплектация кулачков токарного патрона текстолитовыми накладками для зажима по ребрам цилиндра

Длина накладок определена расстоянием от торца детали до последнего ребра, может изменяться в зависимости от модификации детали. Определена оптимальная ширина каждой накладки, она составляет 40 мм.

С целью снижения копирования погрешностей заготовки был заказан и внедрен агрегатно-расточный станок с ЧПУ АРС-4/Ц (рис. 5). Станок имеет четыре шпинделя, предназначен для обработки 2 заготовок одновременно [5]. Последовательно осуществляется чистовая и черновая обработка внутренней поверхности цилиндра, а именно правым шпинделем черновая, затем левым – чистовая обработка.

Существенным технологическим преимуществом совмещения чистовой и черновой обработки внутренней поверхности цилиндра, является отсутствие погрешностей установки между чистовой и черновой обработкой. Это обеспечивает, в соответствии с формулой (1), при условии, что вследствие повышенной жесткости и точности специального агрегатно-расточного станка, каждая позиция растачивания дает уточнение $\varepsilon = 10$. Тогда доля наследственной погрешности формы зеркала цилиндра после 3-х переходов растачивания составит:

$$\Delta_{\text{дет3}} = \Delta_{\text{зар}} \prod_{i=1}^3 \left(\frac{\lambda_i C_{pi} S_i^q}{J_i} \right)^3 = \frac{1,2}{600} = 0,002 \text{ мм.}$$

Такое значение наследственной погрешности формы зеркала цилиндра после 3-х переходов растачивания – $\Delta_{\text{дет3}} = 0,002$ мм, меньше допуска на погрешность формы готового отверстия.

Теоретические предпосылки дали обоснование замены двух операций: алмазно-расточной на станке 1Р-СТ95 и хонинговальной операции на вертикально-хонинговальном станке 3822ОП40 в базовом технологическом процессе на одну – двойное растачивание на агрегатно-расточном станке с ЧПУ АРС-4/Ц. Для проверки заявленных параметров детали после обработки на агрегатно-расточном станке АРС-4/Ц была обработана опытная партия цилиндров, в количестве 26 шт., при уточнении $\varepsilon = 10$ на каждой позиции (табл. 3).

Результаты, полученные при обработке на агрегатно-расточном станке с ЧПУ АРС-4Ц, показывают, что фактические погрешности формы поверхности зеркала превышают, рассчитанные по формуле (1). Это объясняется наличием погрешности базирования при установке на операции совмещенного растачивания, а также неоднородностью структуры отливки по плотности [3] и, соответственно, по твердости, вызывающих колебание радиальной составляющей силы резания и отжимов реза от обрабатываемой поверхности. Указанные в табл. 3 погрешности успешно удаляют хонингованием [4, 6]. Обработка на данном станке заменяет две операции: алмазно-расточную на станке 1Р-СТ95 и хонинговальную операцию на вертикально-хонинговальном станке 3822ОП40 и дает высокие показатели обрабатываемой поверхности.



Рис. 5. Обработка цилиндра на агрегатно-расточном станке с ЧПУ АРС – 4/Ц

В результате обработки опытной партии цилиндров был сделан вывод о целесообразности введения агрегатно-расточной операции на станке с ЧПУ АРС-4/Ц в технологический процесс механической обработки цилиндров и применения однократного хонингования. Отклонения диаметра после однократного хонингования не превышают 0,028 мм, а отклонения от круглости – 0,006 мм, что укладываемо-

ются в заданные допуски. Операции механической обработки зеркала цилиндра модернизированного технологического процесса представлены в табл. 4.

3. Геометрические параметры зеркала цилиндров Ø85 мм, Ø95 мм, полученные при обработке на агрегатно-расточном станке APC-4/Ц

Проверяемые параметры	Параметры, заданные по разработанному вновь технологическому процессу	Результаты, полученные при обработке на агрегатно-расточном станке с ЧПУ APC-4Ц (параметры точности), мм
Внутренний Ø85, мм	Ø84,92 + 0,05	0,016...0,038
Внутренний Ø95, мм	Ø94,92 + 0,05	0,016...0,025
Допуск круглости, мкм	не задан	0,003...0,02
Допуск цилиндричности, мкм	10	0,009
Допуск радиального биения внутренней поверхности относительно наружной, мкм	не задан	0,05
Шероховатость, Ra, мкм	2,5	1,2...1,7 мкм

4. Операции механической обработки зеркала цилиндра модернизированного технологического процесса

№ и название операции	Модель оборудования	Штучное время, мин
(1) 0350 Токарная с ЧПУ	Токарный с ЧПУ 1ТНС-6008	6,99
(2) 0640 Расточная	Агрегатно-расточной станок APC-4/Ц	6,03
(3) 1120 Хонинговальная с ЧПУ	Хонинговальный с ЧПУ СС740В2	3,5
Итого		16,52

Сопоставление трудоемкости изготовления изделий по новой технологии (см. табл. 4) по сравнению с базовой трудоемкостью при годовой программе выпуска 1500 ед. составит экономию 609,25 нормо-часов.

Выводы

1. Проведенные опытные работы показывают целесообразность максимально точной обработки зеркала цилиндра растачиванием перед хонингованием. Это повышает общую производительность и качество цилиндров.

2. Полученные результаты показывают, что совмещение двух переходов растачивания на одной операции позволяет на порядок снизить наследственные погрешности формы расточенного отверстия и сократить количество операций хонингования до одной.

3. Опытные результаты показывают более высокую исправляющую способность растачивания по сравнению с хонингованием. Кроме того, при растачивании заготовка не так сильно нагревается ввиду концентрированной зоны резания по сравнению с размерами и объемом металла заготовки.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Производственное Объединение "ТУЛАМАШЗАВОД". [Электронный ресурс] URL: www.tulamash.ru. Дата обращения: 18.03.2018.
2. Ямников, А.С., Сафарова, Л.Л. Синтез диаграммы Аббота // Известия ТулГУ. Технические науки. – 2018. – № 8. – С. 30 – 34.
3. Ямников, А.С., Сафарова, Л.Л. Снижение влияния технологической наследственности на точность хонингованных заготовок цилиндров применением естественного старения // Черные металлы. – 2019. – № 11. – С. 47 – 51.
4. Бабичев, А.П., Полянчиков, Ю.Н., Славин, А.В. Хонингование: [монография] // под ред. А.П. Бабичева. – Волгоград: ВолгГАСУ, – 2013. – 245 с.
5. Ямников, А.С. Сафарова, Л.Л. Повышение производительности обработки зеркала цилиндра двигателя // Черные металлы. – 2020. – № 9. – С. 68 – 72.
6. Ямников, А.С., Сафарова, Л.Л. Технологическое обеспечение износоустойчивости зеркала цилиндра дизеля. // Сб. науч. статей международной конференции «Проблемы прикладной механики» под общей редакцией М.Г. Шалыгина, 01 – 03 декабря 2020г. – Брянск: БГТУ, 2020. – 214 с. – ISBN 978-5-907-271-56-2. – С. 189 – 194.

REFERENCES

1. Manufacturing Association "TULAMASHZAVOD". [Electronic resource] URL: www.tulamash.ru. Address date: 18.03.2018.
2. Yamnikov, A.S., Safarova, L.L. Abbot's diagram synthesis. // *Proceedings of TulaSU. Engineering Sciences.* – 2018. – No.8. – pp. 30-34.
3. Yamnikov, A.S., Safarova, L.L. Technical heredity impact decrease upon accuracy of honed billets of cylinders with natural ageing use. // *Ferrous Metals.* – 2019. – No.11. – pp. 47-51.
4. Babichev, A.I., Polyanchikov, Yu.N., Slavin, A.V. *Honing*: [monograph] // under the editorship of A.P. Babichev; Ministry of Education and Science of the Russian Federation; Volgograd State Architectural-Construction University; Don State Technical Univedrsity. – Volgograd: VolgogradSACU, - 2013. – pp. 245.
5. Yamshchikov, A.S., Safarova, L.L. Productivity increase in machining engine cylinder face. // *Ferrous Metals.* – 2020. – No.9. – pp. 68-72.
6. Yamnikov, A.S., Safarova, L.L. Technological support of cylinder face wear-resistance in diesel engine. // *Proceedings of the Inter. Conf. "Applied Mechanics Problems"* under the general editorship of M.G. Shalygin, December 1 – 3, 2020. – Bryansk: BSTU, 2020. – pp. 214. - ISBN 978-5-907-271-56-2. —pp. 189-194.

Рецензент д.т.н.
Владимир Федорович Макаров