

¹Набережночелнинский институт
(филиал) Казанского (Приволжского)
федерального университета,
г. Набережные Челны
²ПАО «КАМАЗ»,
г. Набережные Челны

НАХОЖДЕНИЕ РАСПРЕДЕЛЕНИЯ ПРИПУСКА ПО КОРЕННЫМ И ШАТУННЫМ ШЕЙКАМ ПОКОВКИ КОЛЕНЧАТОГО ВАЛА ПО ДАННЫМ КООРДИНАТНЫХ ИЗМЕРЕНИЙ

В статье выполнен анализ различных способов обеспечения геометрических параметров поковок в процессах горячей объемной штамповки. Установлен факт высокой результативности координатных измерений геометрических показателей поковок для обеспечения выявления негативных производственных факторов, влияющих на геометрическую точность изготовления поковок. Конструкции распространенных контрольных приспособлений и схемы измерений геометрических показателей поковки коленчатого вала не позволяют выполнять координатные измерения поковки коленчатого вала в цеховых условиях. Рассмотрены координатная схема, конструкция контрольного приспособления и методика определения размеров параметров распределения припуска по коренным и шатунным шейкам коленчатого вала. На основе приведенной в статье методики определения параметров распределения припуска разработана методика управления геометрической точностью горячей объемной штамповки, улучшена точность контроля выходных параметров геометрической точности поковок коленчатых валов большегрузных автомобилей.

Ключевые слова: поковка коленчатого вала, горячая объемная штамповка, распределение припуска, координатные измерения, коренные и шатунные шейки.

Введение. Для процесса горячей объемной штамповки характерно сложное пространственное коробление коренных и шатунных шеек, а также противовесов [1, 2]. Актуальной, до настоящего времени не решенной задачей, является улучшение геометрической точности поковок коленчатых валов по всем ключевым показателям точности — размерам диаметральных и коренных шеек, угловых отклонений шатунных шеек, изгиба поковки по третьей коренной шейке и радиусу кривошипа. Для этого необходимо решение задачи одновременного управления по всем геометрическим показателям точности путем проведения своевременных наладочных смещений. Для решения данной задачи необходимо обеспечить управление процессом не в отдельности по каждому единичному ключевому показателю точности, а по интегральному показателю точности. Таким показателем является распределение припуска по коренным и шатун-

ным шейкам коленчатых валов. Найти распределение припуска можно только по результатам выполнения координатных измерений поковки коленчатого вала, причем они должны быть выполнены в цеховых условиях, которые выполняются в условиях значительно отличающихся от стандартных условий линейных размеров деталей машин. До настоящего времени практика выполнения цеховых координатных измерений для нахождения параметров распределения припуска по коренным и шатунным шейкам поковок коленчатых валов отсутствует.

В современных публикациях встречаются примеры применения координатных измерений различных поковок простой формы для решения различных производственных задач. Например, в [3] выполнено исследование стабильности штамповки поковки детали поводок. Стабильность обеспечивалась в двух последовательных операциях изготовления детали. Для разработ-

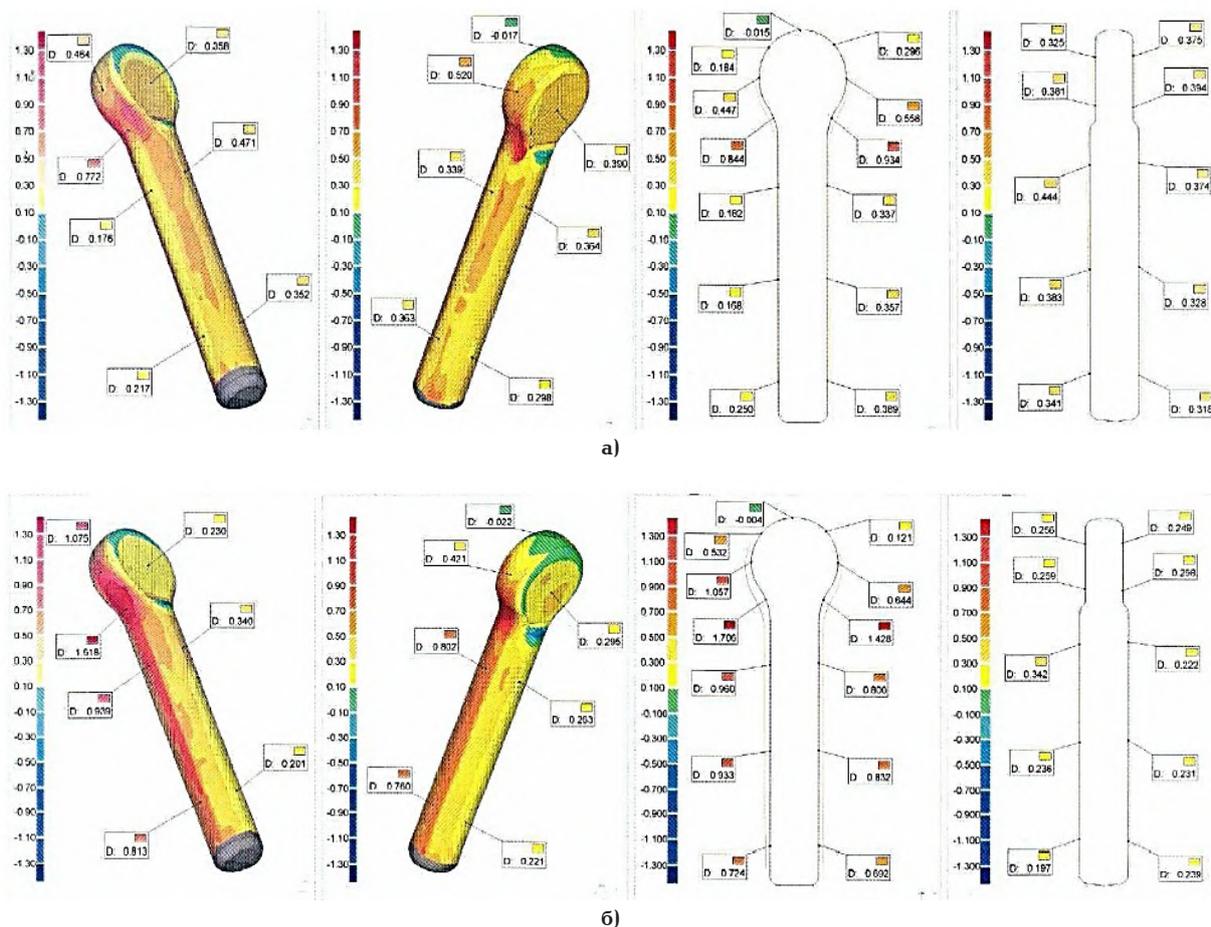


Рис. 1 Протокол отклонений штампованных деталей после: а) штамповки, б) правки [1]

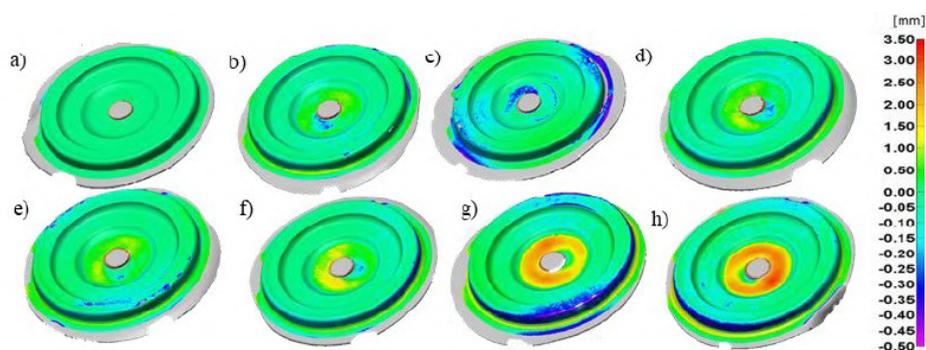


Рис. 2. Развитие износа на поверхности форм при различном количестве отштампованных поковок: а) 1000, б) 2000, с) 3000, д) 4000, е) 5000, ф) 6000, г) 7000, х) 8000 [5]

ки рекомендаций по повышению их точности выполнялся отбор заготовок после штамповки и калибровки. Обработанные поковки измеряются на оптической координатно-измерительной машине. Сканированная 3D модель поковок сравнивалась с ее номинальной моделью. Анализ предусматривает поиск максимальных отклонения профиля в двух плоскостях — горизонтальной и вертикальной (рис. 1). Авторы выполняют анализ данных по наибольшим отклонениям сканированных моделей от проектных моделей штампованных деталей. На основе данных сравнения моделей оценивается точность разработанного процесса штамповки. В [4] рассматрива-

ется пример обработки данных 3D сканирования для определения закономерностей изнашивания штамповой оснастки (рис. 2). Координатные измерения позволили точно определить зоны с наибольшим износом для повышения их стойкости. В [5, 6] по такому же принципу сравнивались штампы с нанесением износостойкого покрытия на рабочие участки гравюр, взаимодействующих с поковкой. Наиболее развитый метод комбинированного применения различных методов приведен в [7]. В этом исследовании приведены результаты применения вибродиагностики процесса горячей объемной штамповки и 3D сканирования с обработкой трехмерных объ-

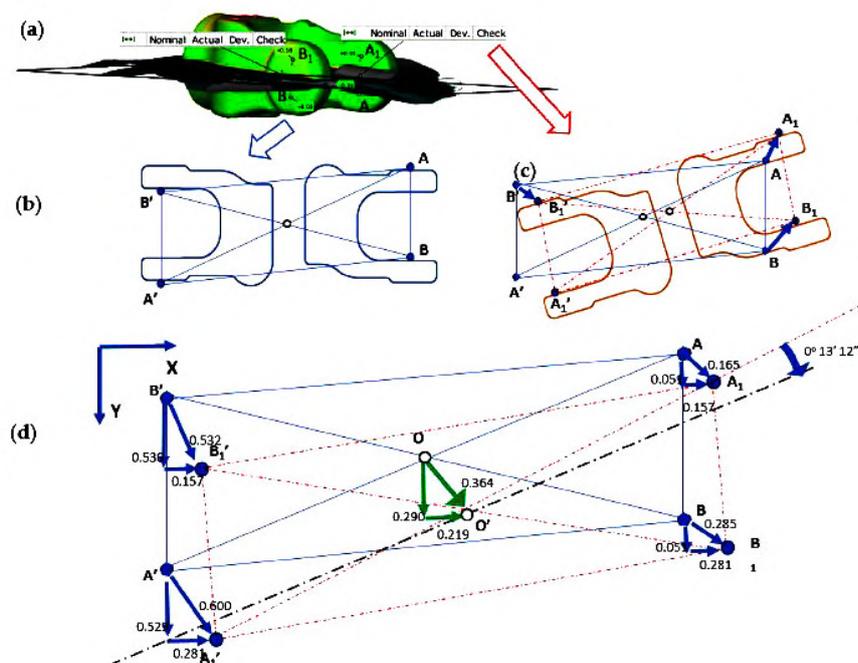


Рис. 3. Поиск отклонений процесса горячей объемной штамповки:
 а) сканированный комплект поковок; б) нарушение углового расположения поковок после штамповки; в) линейные смещения поковок [7]



Рис. 4. Цеховое измерительное приспособление для контроля геометрических показателей поковок коленчатых валов на роликовых опорах

ектов в САПР Solid Works. В работе решается более сложная задача по определению смещений штамповой оснастки для улучшения геометрической точности поковок. Комбинированное применение различных методов исследований позволило выявить динамические факторы процесса штамповки, а также отклонения в изготовлении быстроперенастраиваемой штамповой оснастки. В результате авторам удалось значительно улучшить геометрические показатели обрабатываемого комплекта поковок деталей рулевого управления (рис. 3).

Таким образом, координатные измерения с идентификацией условий выполнения процесса позволяют на более глубоком уровне изучить особенности процесса пластической деформации и закономерности изменения геометрических размеров поковок. Только на их основе возможно определение параметров распределения припуска по обрабатываемым поверхностям поковок. Существующие координатно-измерительные машины обладают рядом ограничений, не позволяющих их применить в цеховых измерениях. Применение оптических сканирующих

систем, как и стационарных координатных измерительных машин, предполагает длительный процесс сканирования и обработки данных, а также обеспечение стандартных условий процесса измерений.

Цеховой контроль геометрических параметров поковок коленчатых валов в основном обычно выполняется в призматических [8, 9] или роликовых опорах, на которые коленчатый вал устанавливается крайними коренными шейками (рис. 4). Существуют и отдельные мобильные приспособления для контроля геометрических показателей одного вида, например, измерений радиуса кривошипа по шатунным шейкам [10]. Координатные высокоточные измерения в подобных приспособлениях невозможны из-за значительных отклонений формы базовых шеек поковки. В механическом производстве геометрические параметры коленчатых валов измеряются от центровых отверстий, отсутствующих у поковок. Таким образом, точные координатные цеховые измерения с применением распространенных контрольных приспособлений выполнить невозможно.

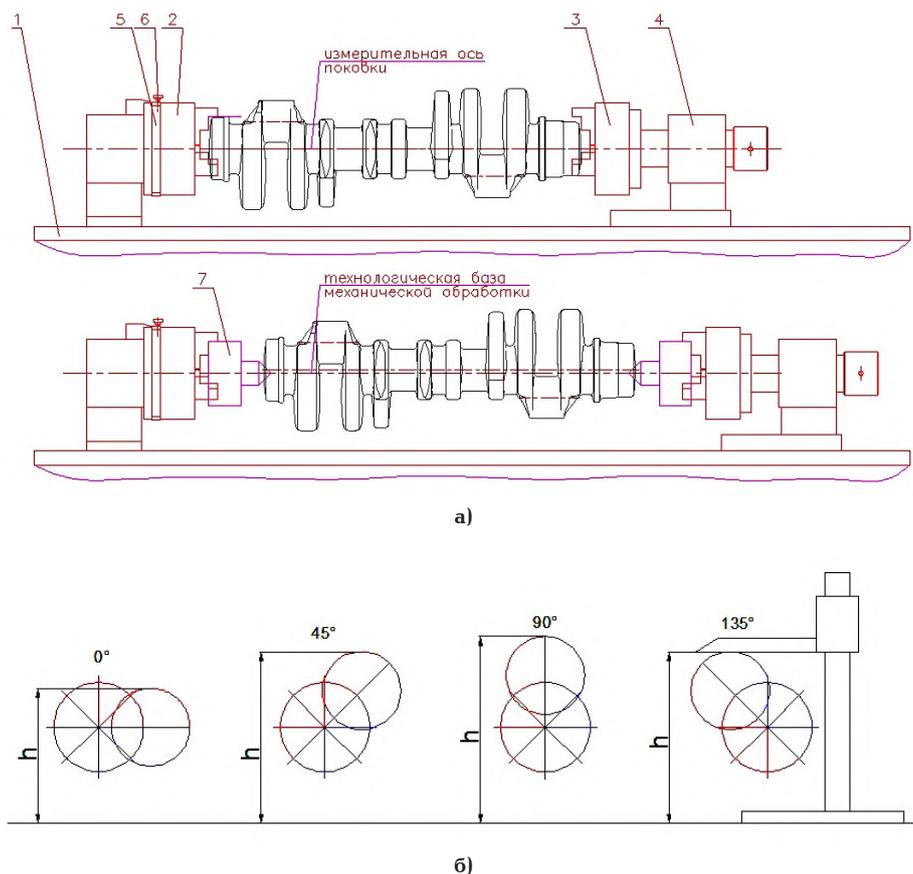


Рис. 5. Контрольное приспособление координатных измерений высотных параметров:
 а) конструкция приспособления: 1 — станина, 2, 3 — патрон трехкулачковый самоцентрирующий, 4 — корпус, 5 — угловой вращающийся лимб, 6 — стопорный винт лимба; б) пример измерений высотных параметров в различных угловых фазах

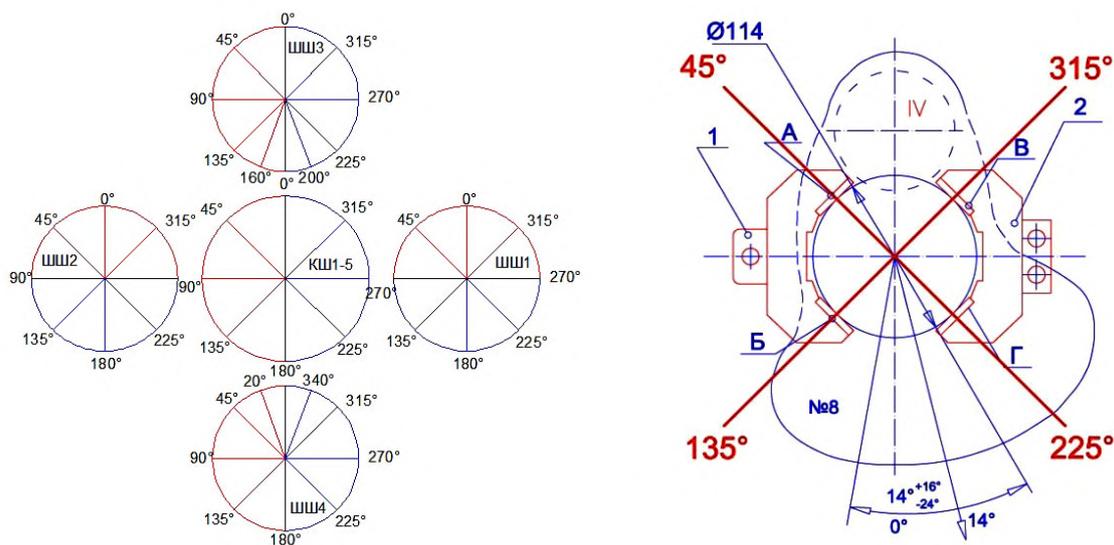


Рис. 6. Точки измерений коренных и шатунных шеек поковки коленчатого вала

Теоретическая часть. Для выполнения цеховых координатных измерений разработано контрольное приспособление, позволяющее выполнить измерения поковки от постоянной оси крайних цапф поковки коленчатого вала. Схема приспособления приведена на рис. 5а. Его особенностью является возможность самоцентриро-

вания цапф поковки в двух-, трехкулачковых патронах и выполнения точных угловых поворотов благодаря наличию угловой шкалы.

Схема измерений поковки коленчатого вала заключается в измерении высотных размеров по коренным и шатунным шейкам с поворотом поковки на заранее заданные углы. На рис. 6 при-

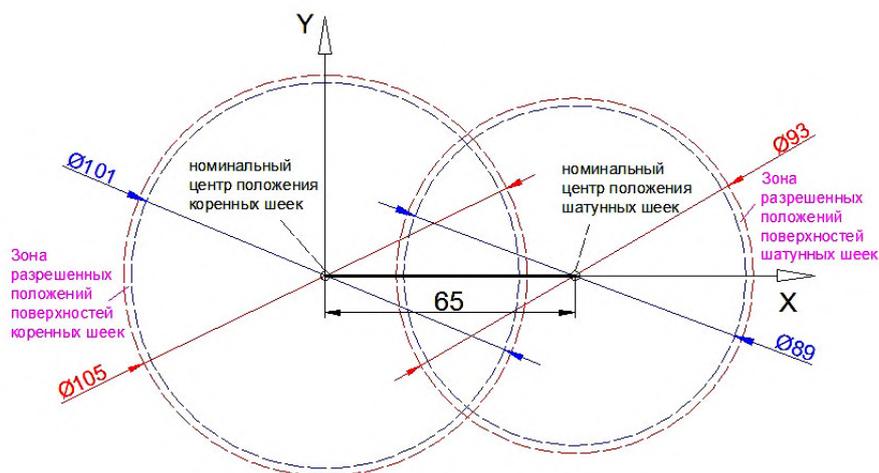


Рис. 7. Система отсчета отклонений геометрических элементов коренной и шатунной шеек коленчатого вала

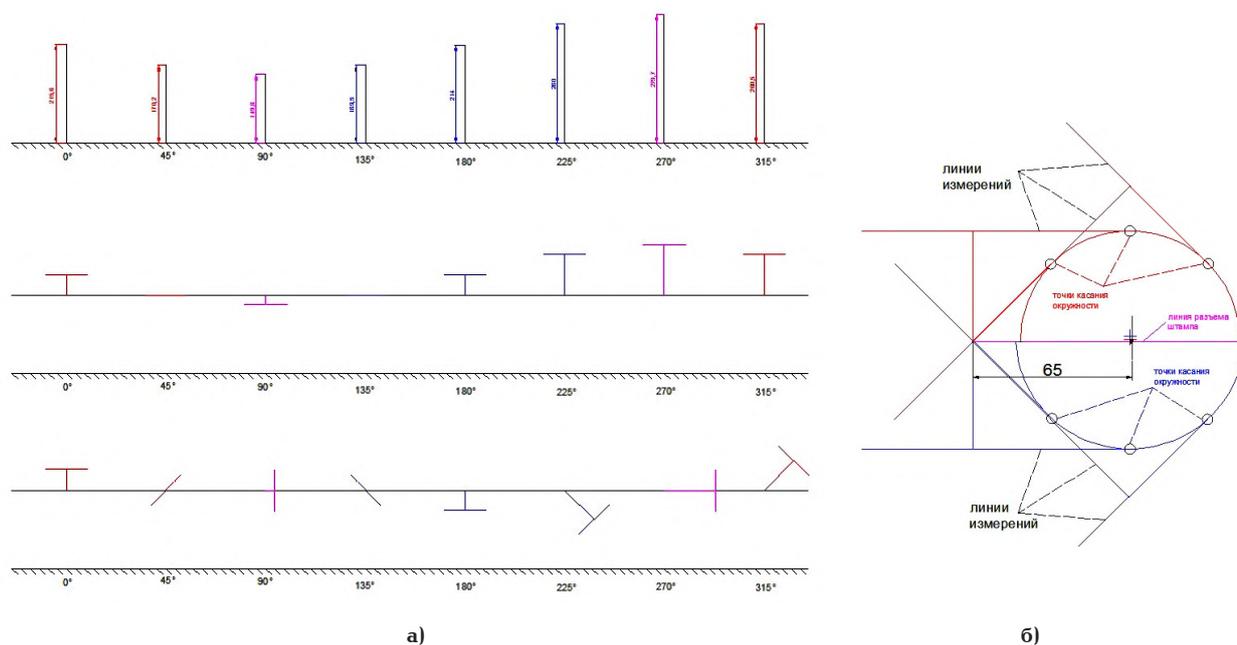


Рис. 8. Графические построения для шатунных шеек поковки коленчатого вала: а) предварительные построения; б) построения для нахождения показателей точности профиля

ведены координаты точек измерений коренных и шатунных шеек поковки коленчатого вала. Измеряемые точки коренных и шатунных шеек ориентируются в угловом направлении через 45° . Данный угол выбран из условий базирования поковки коленчатого вала в самоцентрирующих призмах во фрезерно-центровальной операции автоматической линии механической обработки (рис. 6б). Дополнительно предусматриваются четыре точки измерений в угловых координатах часто возникающего дефекта «чернота» по шатунным шейкам (160° , 200° по третьей шатунной шейке; 20° , 340° по второй шатунной шейке).

Измеренные высотные размеры затем встраиваются в единую систему координат (рис. 7). Для иллюстрации метода расчета показателей припуска для шатунных шеек поковки коленчатого вала выполнены графические построения,

приведенные на рис. 8 и 9. Они выполняются в системе отсчета отклонений геометрических элементов коренной и шатунной шеек коленчатого вала. Система отсчета состоит из номинальных положений центров коренных и шатунных шеек, а также минимальных и максимальных окружностей, задающих допуск положению их профилей. Геометрические построения для шатунных шеек выполняются путем переноса в центральную точку коренных шеек с дальнейшим поворотом на заранее заданный в соответствии со схемой измерений угол измерения высотных размеров поковки коленчатого вала. Искомый профиль шатунных шеек находится в виде окружности, касательной к трем линиям наконечников измерительного наконечника штангенрейсмаса (рис. 8б). Для коренных шеек высотные размеры переносятся и поворачива-

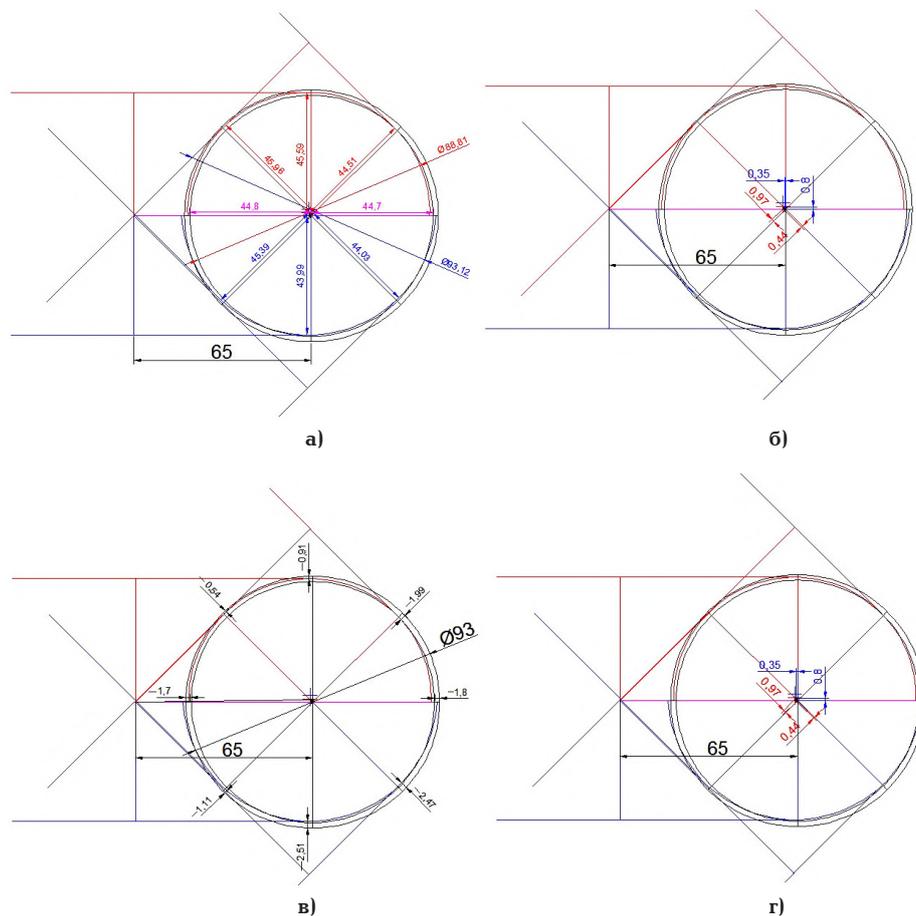


Рис. 9. Показатели точности шатунной шейки коленчатого вала:

- а) радиальные размеры; б) отклонения центров диаметральных размеров;
 в) отклонения точек профиля коренной шейки от границы минимального припуска;
 г) отклонения центров вписанных окружностей относительно центра положения шатунной шейки вала

ются на соответствующий угол в номинальный центр положения коренной шейки. Затем каждый размер уменьшается на величину высоты центров контрольного приспособления.

В результате выполненных геометрических построений можно найти различные показатели точности — радиальные размеры, отклонения центров диаметральных размеров, отклонения точек профиля коренной шейки от границы минимального припуска, отклонения центров вписанных окружностей относительно центра положения шатунной шейки. Найденные значения показателей могут использоваться для различных задач — управления наладочными смещениями и улучшения геометрии гравюр ковочных вставок. Приведенные выше графические построения трудоемки, поэтому разработаны математические формулы, позволяющие по измеренным значениям высотных размеров сразу рассчитать значения припусков и координат центральных точек диаметральных размеров в каждой измерительной угловой фазе.

Показатели припуска для коренных шеек находятся по следующим формулам:

$$\delta_{\text{кши}} = R_{\text{кши}} - \frac{D_{\text{max}}}{2}, \quad (1)$$

где D_{max} — предельное минимальное значение диаметрального размера по коренным шейкам коленчатого вала;

$R_{\text{кши}}$ — радиальный угловой размер в i -ой угловой фазе коренной шейки поковки коленчатого вала.

$$R_{\text{кши}} = h_{\text{кши}} - H_{\text{оц}}, \quad (2)$$

где $h_{\text{кши}}$ — высотный параметр, измеряемый в i -ой угловой фазе коренной шейки коленчатого вала;

$H_{\text{оц}}$ — высота линии центров контрольного приспособления.

Показатели припуска для шатунных шеек коленчатого вала рассчитываются по следующей формуле:

$$\Delta_{\text{ш.ш.}i} = R_{\text{ш.ш.}i} - \frac{D_{\text{ш.ш.}i.\text{min}}}{2}, \quad (3)$$

где $D_{\text{ш.ш.}i}$ — предельное минимальное значение диаметрального размера по шатунным шейкам коленчатого вала;

$R_{\text{ш.ш.}i}$ — радиальный размер шатунной шейки в i -ой угловой фазе находится как расстояние

между номинальным центром положения шатунных шеек коленчатого вала и прямой, развернутой на соответствующий угол поворота

$$R_{ш.ш.} = a_1 x_c + b_1 y_c + C_1, \quad (4)$$

где x_c, y_c — координаты номинального центра положения шатунных шеек коленчатого вала относительно номинального центра коренных шеек. Для первой шатунной шейки $x_c = 65, y_c = 0$, для второй шатунной шейки $x_c = 0, y_c = -65$, для третьей шатунной шейки $x_c = 0, y_c = 65$, для четвертой шатунной шейки $x_c = -65, y_c = 0$;

a_1, b_1, C_1 — коэффициенты в уравнении прямых, повернутых на соответствующие схеме

измерений поковки коленчатого вала угловые фазы.

$$a_1 = a \cdot \cos \alpha - b \cdot \sin \alpha;$$

$$b_1 = a \cdot \sin \alpha + b \cdot \cos \alpha; C_1 = 0,$$

где α — значение угла, соответствующее угловым фазам — $0^\circ, 45^\circ, 90^\circ, 135^\circ, 180^\circ, 225^\circ, 270^\circ, 315^\circ$;

$a=0, b=1, C = h_{кшш} - H_{оц}$ — коэффициенты уравнения вертикальной прямой, полученной в результате измерения высотных размеров штангенрейсмасом.

Отклонения центральных точек диаметральных размеров для коренных шеек в угловых



а)



б)

Рис. 10. Измерение высотных размеров по коренным и шатунным шейкам коленчатого вала:

а) измерение цифровым штангенрейсмасом; б) выставленное значение по углу разворота поковки коленчатого вала

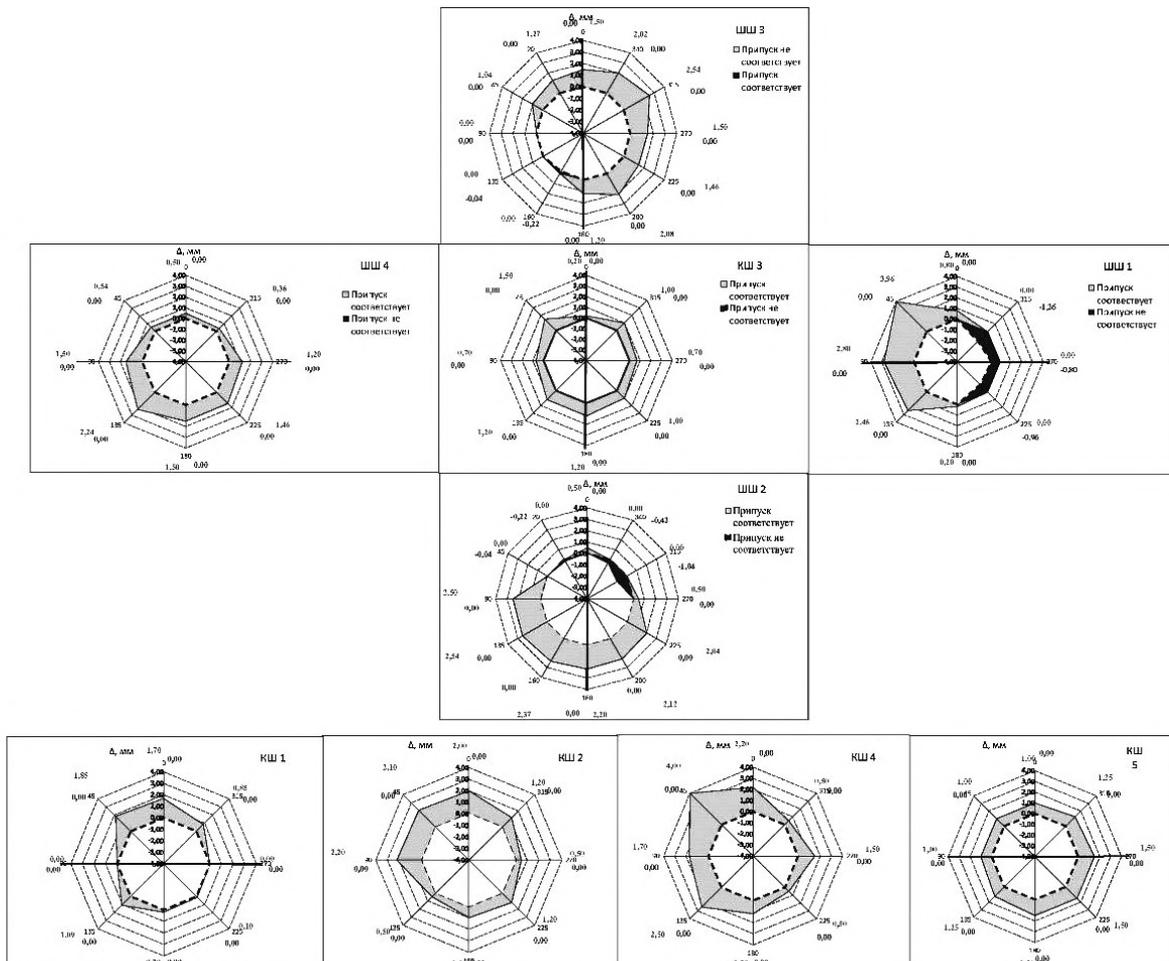


Рис. 11. Распределение припусков по коренным и шатунным шейкам поковки коленчатого вала



Рис. 12. Дефект механической обработки поковки коленчатого вала в виде «черноты» по шатунным шейкам

фазах $0^\circ - 180^\circ$ находятся по следующей формуле:

$$\varepsilon_{0^\circ - 180^\circ} = R_{\text{кш}0^\circ} - R_{\text{кш}180^\circ}, \quad (5)$$

где $R_{\text{кш}0^\circ}$ — радиальный размер коренной шейки в угловой фазе 0° ;

$R_{\text{кш}180^\circ}$ — радиальный размер коренной шейки в угловой фазе 180° .

Для шатунных шеек отклонения центральной точки в угловых фазах $0^\circ - 180^\circ$ находятся по следующей формуле.

$$\varepsilon_{0^\circ - 180^\circ} = R_{\text{ш.ш}0^\circ} - R_{\text{ш.ш}180^\circ}, \quad (6)$$

где $R_{\text{ш.ш}0^\circ}$ — радиальный размер коренной шейки в угловой фазе 0° ;

$R_{\text{ш.ш}180^\circ}$ — радиальный размер коренной шейки в угловой фазе 180° .

Для угловых фаз $45^\circ - 225^\circ$, $90^\circ - 270^\circ$, $135^\circ - 315^\circ$ коренных и шатунных шеек поволовок коленчатых валов величины отклонений находятся аналогично.

Практическая реализация. Методика координатных цеховых измерений поволовок большегрузных автомобилей реализована на Кузнечном заводе ПАО на контрольных операциях в процессе изготовления коленчатых валов двигателей автомобилей КамАЗ. На рис. 10 приведены фотографии спроектированного и изготовленного контрольного приспособления, а также процесса измерений высотных размеров поковки коленчатого вала. Для автоматизации построения распределений припуска по всем шейкам коленчатого вала на основе Microsoft Excel разработан программный продукт. На рис. 11 приведена основная графическая форма программного продукта. Светло-серым цветом выделены найденные соответствующие значения припуска, черным цветом — несоответствующие значения.

Как видим, вследствие неблагоприятной комбинации распределения диаметральных размеров, угловых отклонений шатунных шеек, изогнутости по третьей коренной шейке и поперечных смещений по линии разреза штампа по первой шатунной шейке в угловой фазе $225^\circ - 270^\circ$, для второй $45^\circ - 270^\circ$, для третьей $90^\circ - 160^\circ$ возможна недостаточность припуска под механическую обработку. Данные измерений подтверждаются

часто возникающим дефектом — нехватки припуска под механическую обработку по шатунным шейкам поковки коленчатого вала. Фотографии дефекта приведены на рис. 12. Во время выполнения стандартных процедур контроля по отдельным метрологическим показателям в процессе штамповки данный дефект не может быть надежно выявлен. Также затрудняется проведение своевременных результативных наладочных смещений прессового оборудования.

Разработанный программный продукт позволяет рассчитать распределение припуска как в измерительной системе координат, так и в системе координат первого и второго установа финишной операции калибровочной операции, что облегчает визуальный анализ данных распределения припуска при ручной доработке гравюр штамповых вставок калибровочного пресса и регулировке закрытой высоты штампа. Выборочный контроль с применением разработанного программного продукта позволяет своевременно выявить наличие несоответствий по распределению припуска изготовленных поволовок коленчатых валов, что позволяет снизить количество внешних дефектов предприятия. В настоящее время изучается вопрос автоматизации измерения поволовок коленчатых валов путем их измерений на токарно-фрезерном станке с ЧПУ. Результаты измерений шестерен на данном оборудовании рассмотрены в работах [11, 12]. Погрешность измерений станочных модулей достаточная для измерений распределения припуска и составляет величину не более 0,05 мм.

Результаты. Внедрение координатных измерений в цеховых условиях с расчетом фактического распределения припуска по коренным и шатунным шейкам повышает надежность контроля партий поволовок коленчатых валов по предотвращению недостаточности припуска по коренным и шатунным шейкам, а также обеспечивает возможность разработки результативной методики управления качеством процессами горячей объемной штамповки.

Библиографический список

1. Володин И. М., Чех А. В., Володин А. И. Исследование формоизменения поковки при обрезке облоя // Проблемы и перспективы развития машиностроения: сб. науч. тр. Междунар. науч.-техн. конф., посвящённой 60-летию

ЛГТУ. Липецк: Изд-во ЛГТУ, 2016. С. 330–335. ISBN 978-5-88247-792-8.

2. Мартюгин А. В., Володин И. М. Снижение влияния деформации при обрезке облоя на геометрическую точность и дисбаланс поковок коленчатых валов // *Colloquium-Journal*. 2019. № 26-2 (50). С. 91–94.

3. Петров А. Н., Валиахметов С. А., Петров П. А. Исследование точности штамповки заготовок из труднодеформируемых сплавов на электровинтовом прессе // *Известия ТулГУ. Технические науки*. 2014. Вып. 10, ч. 2. С. 162–168.

4. Hawryluk M., Ziemba J. Application of the 3D reverse scanning method in the analysis of tool wear and forging defects // *Measurement*. 2018. Vol. 128. P. 204–213. DOI: 10.1016/j.measurement.2018.06.037.

5. Gronostajski Z., Hawryluk M., Kaszuba M. [et al.]. The use of 3D scanning methods to evaluate the hybrid layer used in forging tools in order to improve their durability // *Archives of Metallurgy and Materials*. 2017. Vol. 62 (3). P. 1549–1558. DOI: 10.1515/amm-2017-0238.

6. Hamrle P., Hlaváč J. Load analysis of crankshaft of two-point crank press // *Proceedings of the 29th DAAAM International Symposium*. 2018. Vol. 29 (1). P. 0601–0608. DOI: 10.2507/29th.daaam.proceedings.087.

7. Ziemba J., Hawryluk M., Rychlik M. Application of 3D scanning as an indirect method to analyze and eliminate errors on the manufactured yoke-type forgings forged in SMED device on modernized crank press // *Materials*. 2021. Vol. 14 (1). P. 1–23. DOI: 10.3390/ma14010137.

8. Александров А. И., Кобяков Н. П. Разметочное дело. Москва: Изд-во Машиностроительной и судостроительной литературы, 1953. 260 с.

9. Стеценко Е. Г., Конарев Ю. Н. Коленчатые валы тепловозных двигателей. Москва: Транспорт, 1985. 110 с.

10. А. с. SU 1618992 А1 Российская Федерация, МПК G 01 В 5/14. Устройство для контроля радиуса кривошипа коленчатых валов / Прохоренко О. С., Андронов С. Ф. № 4371695; заявл. 30.12.87; опубл. 07.01.91.

11. Кондрашов А. Г., Сафаров Д. Т. Автоматизированное измерение и коррекция длины общей нормали зубчатых

коленчатых валов в операциях зубофрезерования на пятикоординатном станке с ЧПУ // *Омский научный вестник*. 2021. № 3 (177). С. 13–19. DOI: 10.25206/1813-8225-2021-177-13-19.

12. Сафаров Д. Т., Кондрашов А. Г. Методика оценки погрешностей автоматизированных измерений длины общей нормали трехкоординатным индикатором на пятикоординатном станке с ЧПУ // *Омский научный вестник*. 2021. № 3 (177). С. 35–43. DOI: 10.25206/1813-8225-2021-177-35-43.

САФАРОВ Дамир Тамасович, кандидат технических наук, доцент (Россия), доцент кафедры материалов, технологий и качества Набережночелнинского института (филиал) Казанского (Приволжского) федерального университета, г. Набережные Челны.

SPIN-код: 4346-4997

AuthorID (РИНЦ): 741369

ORCID: 0000-0002-8297-4524

AuthorID (SCOPUS): 6603409746

ResearcherID: 6834-2018

Адрес для переписки: Safarov-dt@mail.ru

ЧЕХ Александр Васильевич, директор Кузнечно-го завода ПАО «КАМАЗ», г. Набережные Челны.

Адрес для переписки: ChehAV@kamaz.ru

Для цитирования

Сафаров Д. Т., Чех А. В. Нахождение распределения припуска по коренным и шатунным шейкам поковки коленчатого вала по данным координатных измерений // *Омский научный вестник*. 2022. № 1 (181). С. 33–41. DOI: 10.25206/1813-8225-2022-181-33-41.

Статья поступила в редакцию 28.12.2021 г.

© Д. Т. Сафаров, А. В. Чех