

УДК 621.97.042

DOI: 10.22213/2413-1172-2022-1-77-90

Уменьшение сложного пространственного коробления поковок коленчатых валов для обеспечения гарантированного припуска по коренным и шатунным шейкам*

А. В. Чех, Кузнечный завод «ПАО «КАМАЗ», Набережные Челны, Россия

Д. Т. Сафаров, кандидат технических наук, доцент, Набережночелнинский институт Казанского (Приволжского) федерального университета, Набережные Челны, Россия

Из общей совокупности размеров поковок коленчатого вала выделены геометрические показатели точности, отражающие сложное их пространственное коробление, – диаметральные размеры коренных и шатунных шеек, угловые отклонения шатунных шеек, изогнутость третьей коренной шейки, поперечное смещение по разьему штампа. Для оценки величины пространственного коробления по выделенным показателям точности в течение периода стойкости гравюр штамповых вставок выполнено измерение партии поковок коленчатого вала с последующим вероятностно-статистическим анализом в виде построения гистограмм распределений, кривых нормального распределения и контрольных карт Шухарта.

На основе полученных статистических данных изменчивости значений показателей рассмотрена комбинация их значений, при которой возникает неисправимый брак по шатунным шейкам поковки коленчатого вала в виде черноты после механической обработки. Недостаточность припуска по коренным и шатунным шейкам возникает при минимальных значениях диаметральных размеров и максимальных значениях отклонений угловых размеров, изогнутости по третьей коренной шейке и поперечному смещению по линии разьема штампа. Установлено, что по диаметральным размерам коренных шеек размах составляет до 4 мм, по первой, второй и третьей шейке – до 2 мм, по второй шейке – до 4 мм. Для предупреждения нехватки припуска наладка ведется по верхней границе допуска. Размах значений поперечных смещений поковки по линии разьема штампа составляет до 0,6 мм, смещение находится близко к верхней границе допуска. Изогнутость поковки, найденная в различных взаимно перпендикулярных направлениях, различна. В первом установе правочной операции она составляет до 1 мм, во втором – до 1,5 мм, что требует улучшений. Наиболее нестабильным показателем относительного расположения шатунных шеек являются отклонения их углового положения, достигающие значений до 2 мм в области их положительных и отрицательных значений.

Рассмотрено техническое решение по локальному изменению профилей гравюр калибровочных вставок пресса горячей правки поковки, позволяющих улучшить схему калибровки поковки коленчатого вала и стабильность изготовления поковок коленчатого вала по угловым отклонениям шатунных шеек, а также уменьшить изгиб по третьей коренной шейке.

Ключевые слова: поковка коленчатого вала, горячая объемная штамповка, статистические методы управления, показатели припуска, коренные и шатунные шейки.

Введение

От качества изготовления поковок коленчатых валов зависит качество дальнейшего изготовления коленчатых валов на последующих этапах жизненного цикла поковки – обработки резанием, сборки, испытаний и эксплуатации. В мировой практике имеются ряд исследований по систематизации и уменьшению дефектности поковок коленчатых валов на основе применения простейших инструментов качества [1, 2]. Рассматривается применение методов бережливого производства для уменьшения дефектности поковок коленчатых валов [3]. Авторами установлено, что частыми дефектами поковок коленчатых валов после горячей объемной штамповки является не

полное заполнение гравюр штампов и деформации.

Проектирование процесса горячей объемной штамповки выполняется в системах автоматизированного проектирования, позволяющих определить необходимую конфигурацию гравюр штамповых вставок с учетом моделирования течения металла для правильного заполнения гравюр штампа [4]. В отдельных работах моделирование на основе конечных элементов дополняется исследованиями по предотвращению выхода неметаллических включений на поверхность поковки [5]; изучению влияния степени деформации на параметры структуры деформируемого металла [6, 7]; оптимизациями режимов горячей объемной штамповки [8] для снижения

затрат или улучшения параметров отдельных конструктивных элементов поковок коленчатых валов [9]. В отечественных специализированных публикациях по обеспечению качества поковок коленчатых валов рассматриваются вопросы, связанные с необходимостью обеспечения дисбаланса поковок коленчатых валов [10–12], рассматриваются условия процесса проектирования поковок, обеспечивающие требования мировых производителей двигателей внутреннего сгорания [13–15]. Отдельные авторы приводят данные экспериментальных исследований процессов пластического деформирования; например, в работах [16, 17] рассматриваются особенности осадки. Исследование выполнялось на специально изготовленных образцах в лабораторных условиях. Результаты приведенных характерных возможно использовать при условии проведения дополнительных теоретических и практических исследований для решения задач уменьшения сложного пространственного коробления.

Таким образом, теме исследования и предотвращения деформаций поковок коленчатых валов в процессах горячей объемной штамповки уделяется мало внимания как в отечественной, так и мировых исследованиях.

Неизбежное коробление поковок должно обеспечивать гарантированный припуск по обрабатываемым поверхностям коренных и шатунных шеек для дальнейшей механической обработки. Припуск задается исходя из условий превышения глубины дефектного слоя, погрешностей станочных систем, микронеровностей поверхности и технологической наследственности [18].

Поковки коленчатых валов изготавливаются горячей объемной штамповкой в технологических операциях вальцовки, штамповки, вырубки, выкрутки и горячей правки. Развитый процесс пластического деформирования материала поковки приводит к сложному пространственному короблению коренных и шатунных шеек, а также противовесов.

На автоматической линии изготовления поковки коленчатого вала точность обеспечивается по следующим геометрическим показателям точности:

- диаметральный размер коренных шеек;
- диаметральный размер шатунных шеек;
- радиус кривошипа;
- угловые отклонения шатунных шеек;
- изгиб поковки по третьей коренной шейке;
- поперечное и продольное смещение верхней и нижней форм штампа.

Все перечисленные выше показатели точности, за исключением продольного смещения верхней и нижней форм штампа, задают распределение припуска по коренным и шатунным шейкам поковки. Особенностью процесса горячей объемной штамповки поковок коленчатых валов является неизбежность изгиба поковки по третьей коренной шейке вследствие вырубки поковки напровал и отклонения по угловому расположению шатунных шеек в результате выкрутки шатунных шеек. Поэтому в производстве принято контролировать изгиб по третьей коренной шейке, поэтому выполняется контроль в месте максимального изгиба по третьей коренной шейке поковки.

Улучшение процесса штамповки коленчатых валов рассмотрено в различных научных работах. В ряде приведенных в библиографических ссылках научных работ решаются задачи уменьшения величины коробления поковок в операциях вырубки. Однако, несмотря на решенные важные технологические задачи, остается проблема уменьшения величины сложного пространственного коробления поковки коленчатого вала, приводящая к наличию необработанных участков по шатунным шейкам в виде недостаточности припуска. На рисунке 1 эти места проявляются в виде черноты после механической обработки шатунных шеек. Места с недостаточным припуском выделены пунктирными областями.



Рис. 1. Дефект механической обработки поковки коленчатого вала в виде черноты по шатунным шейкам

Fig. 1. Defect of mechanical processing of the forging of the crankshaft in the form of blackness on the connecting rod necks

Цель исследования – выявление причин недостаточности припуска по коренным и шатунным шейкам поковки коленчатого вала в операциях горячей объемной штамповки путем нахождения показателей точности сложного пространственного коробления на основе применения статистических методов управления качеством и последующей разработки мероприятий по улучшению геометрической точности поволоков коленчатых валов.

Изменчивость специальных показателей поволоков коленчатых валов

Выявление причин указанного вида дефекта, приводящих к недостаточности припуска по коренным и шатунным шейкам поковки коленчатого вала, можно было бы выполнить на основе методик планирования эксперимента, при этом необходимо обеспечить исследование значительного объема деталей минимум $3 \cdot 2^6$, а максимум – $5 \cdot 2^6$. Практическое выполнение требований планирования эксперимента в таком объеме в производстве поволоков коленчатых валов невозможно. Выделенная совокупность из шести групп показателей закономерно изменяется в пределах стойкости гравюр штамповой оснастки [19, 20], которая до восстановления выдерживает 3100 съемов поволоков. Поэтому статистический сбор и обработка данных контрольных измерений поволоков коленчатого вала выполнен для указанной совокупности поволоков. Полученных данных достаточно для анализа их изменчивости использования для дальнейшего улучшения процессов горячей объемной штамповки.

На рисунке 2 приведены полученные кривые нормального распределения по каждому специальному показателю точности поковки коленчатого вала, влияющего на относительное положение шатунных шеек.

Полученные экспериментальные данные проверены на принадлежность наиболее распространенным для анализа распределений геометрических показателей точности законам распределения – нормальному, Рэлея, Симсона, равновероятностному. Оценка выполнена по критерию Пирсона χ^2 :

$$\chi_{\text{оп}}^2 = \sum_{i=1}^m \frac{(f_i - f_i')^2}{f_i'}$$

где m – число сравниваемых частот; f_i – действительная относительная частота i -го интервала значений случайной величины.

Для заранее заданной вероятности при выполнении условия $\chi_{\text{оп}}^2 < \chi_{\text{кр}}^2$ выполняется заклю-

чение о соответствии рассматриваемого эмпирического распределения теоретическому.

В таблице 1 приведены результаты анализа эмпирических распределений на соответствие различным распределениям.

По найденным значениям критериям Пирсона для различных теоретических законов распределений определены вероятности их приближения к действующим законам распределения. Для большинства геометрических показателей поковки наибольшая вероятность соответствует нормальному закону распределения, поэтому этот закон принят за основной при оценке стабильности процесса изготовления поволоков. По сравнению с альтернативными законами распределения нормальный закон задает больший запас точности при одинаковой изменчивости показателей.

Как можно видеть, стабильность по отдельным геометрическим показателям не обеспечивается. В основном процесс не стабилен по показателям углового отклонения шатунных шеек и радиальному размеру кривошипа, в особенности по второй шатунной шейке. Значителен размах кривой нормального распределения для диаметральных размеров по второй шатунной шейке. Также нестабилен процесс по изогнутости по третьей коренной шейке в плоскости $45 \dots 225^\circ$.

В соответствии с полученными данными рассмотрим возможный вариант неблагоприятной комбинации геометрических показателей, приводящих к недостаточности припуска по шатунным шейкам поковки коленчатого вала. Для этого по шатунным шейкам поковка должна получить минимальный диаметральный размер, по угловому отклонению и поперечному смещению штампа – максимальные, по радиальному размеру кривошипа – минимальные или максимальные значения. По коренным шейкам поковка должна быть изготовлена с максимальными значениями изгиба в двух взаимно перпендикулярных плоскостях и минимальным значением диаметрального размера из найденных значений размахов кривой нормального распределения.

Построение (рис. 3) выполнено для следующих значений показателей по шатунным шейкам: угловое отклонение шеек – 3 мм, поперечное смещение штампа – 0,7 мм, диаметральный размер – 87 мм. В результате профиль шатунной шейки оказывается расположенным ниже номинального ее положения после чистовой обработки.

По коренным шейкам построение выполнено для суммарного в двух взаимно перпендикуляр-

ных плоскостях значения изгиба по третьей коренной шейке 1,8 мм и минимальных значениях их диаметральных размеров.

В результате по шатунной шейке при неблагоприятном сочетании значений геометриче-

ских показателей возможна недостаточность припуска на полустиковых операциях механической обработки, приводящая к дефектам в виде черноты после операции охватывающего фрезерования (рис. 3).

Таблица 1. Результаты проверки на соответствие теоретическим законам распределений показателей точности поковок коленчатых валов

Table 1. The results of checking for compliance with the theoretical laws of distribution of accuracy indicators of forgings of crankshafts

Показатели		Число степеней свободы f	Вероятность закона распределения %				Параметры распределения	
			Нормальный	Релея	Симпсона	Равновероятный	σ , мм	\bar{d} , \overline{YO} , \bar{I} , $\bar{R}_{ш.ш}$, мм
Диаметральные размеры шатунных шеек	$d_{ш.ш} 1$	9	75	65	59	50	90,071	0,406
	$d_{ш.ш} 2$	9	79	68	62	55	89,368	0,74
	$d_{ш.ш} 3$	9	85	70	65	57	89,787	0,293
	$d_{ш.ш} 4$	9	81	72	63	50	90,039	0,392
Диаметральные размеры коренных шеек	$d_{к.ш} 1$	9	89	74	81	45	104,277	0,384
	$d_{к.ш} 2$	9	92	86	89	48	105,01	0,39
	$d_{к.ш} 3$	9	91	83	87	37	103,848	0,553
	$d_{к.ш} 4$	9	88	79	83	38	104,619	0,415
	$d_{к.ш} 5$	9	90	75	83	34	104,81	0,26
Угловые отклонения	УО 2	11	73	60	70	35	0,261	0,831
	УО 3	11	80	62	65	41	-1,781	0,627
	УО 4	11	87	65	63	46	-1,003	0,505
Изгибы по третьей коренной шейке	И 45°	7	65	55	62	35	0,58	0,35
	И 225°	7	72	83	65	42	0,29	0,192
Поперечное смещение по линии разреза штампа	ПС	9	94	82	72	48	0,47	0,113
Радиусы кривошипов по шатунным шейкам	$R_{ш.ш} 1$	11	65	58	50	34	64,219	0,75
	$R_{ш.ш} 1$	11	70	60	52	43	66,995	0,864
	$R_{ш.ш} 1$	11	76	59	52	36	66,147	0,487
	$R_{ш.ш} 1$	11	73	55	46	38	65,171	0,601

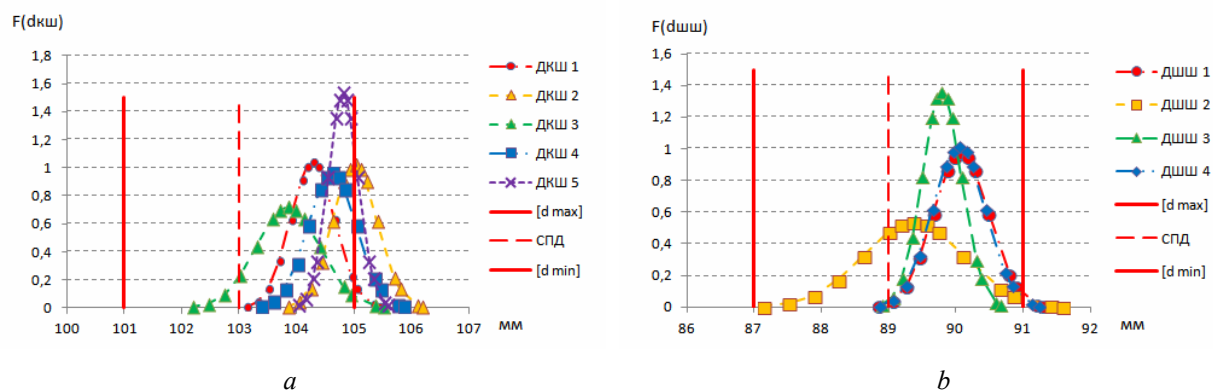


Рис. 2. Графики нормального распределения диаметральных размеров коренных шеек (а); шатунных шеек (b) (продолжение см. на с. 81)

Fig. 2. Graphs of the normal distribution of diametrical dimensions of the root, (a) connecting rod necks (b) (to be continued on p.81)

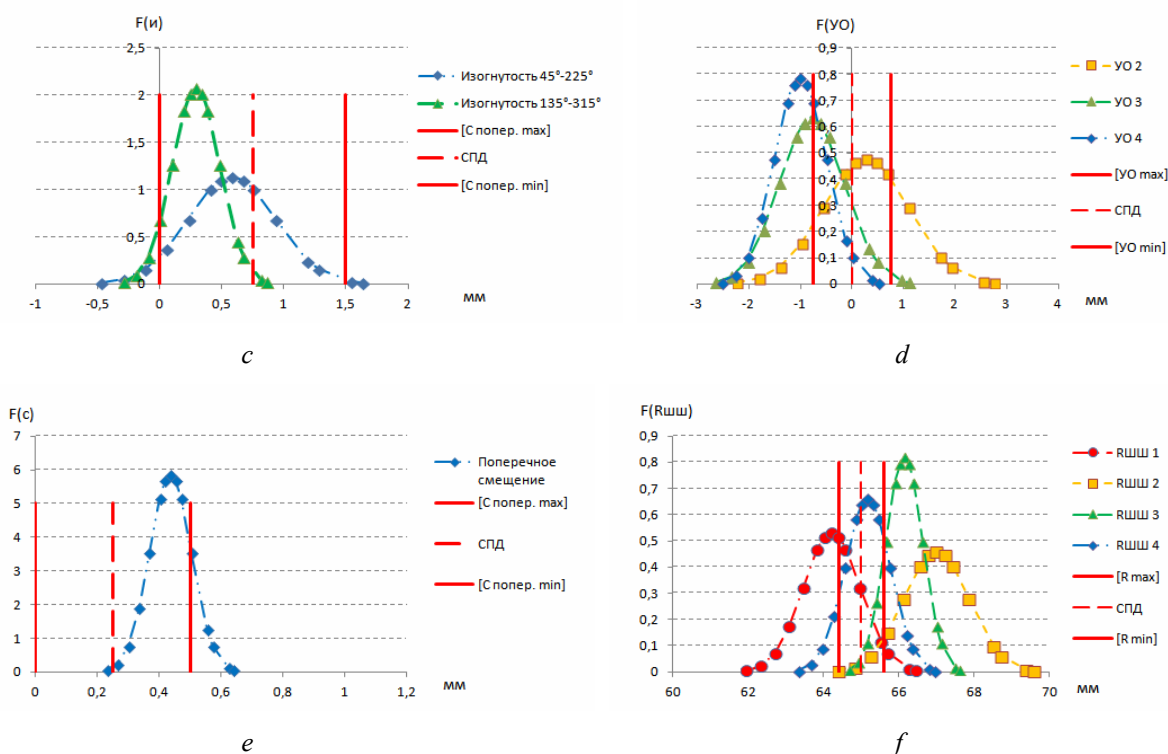


Рис. 2 (окончание): шатунных шеек (b); биений по третьей коренной шейке (c); угловых отклонений шатунных шеек (d); смещений по поверхности разреза штампа (e); радиальных размеров кривошипа (f)

Fig. 2 (continued): beats along the third root neck (c), angular deviations of the connecting rod necks (d), displacements along the surface of the stamp connector (e), radial size of the crank (f)

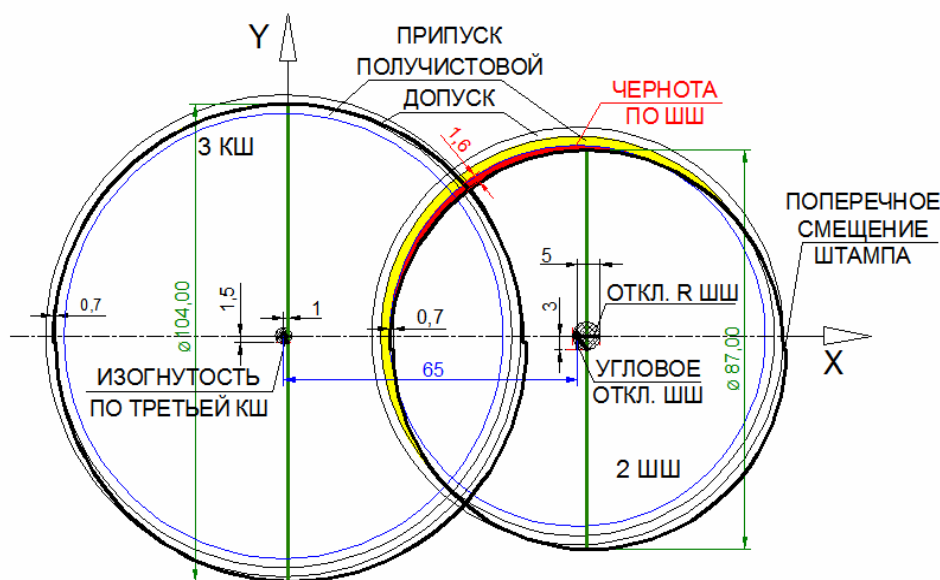


Рис. 3. Пример неблагоприятной комбинации геометрических показателей поковки коленчатого вала, приводящей к недостаточности припуска по шатунным шейкам коленчатого вала

Fig. 3. An example of an unfavorable combination of geometric parameters of a forging of a crankshaft, leading to insufficient allowance for the connecting rod journals of the crankshaft

Таким образом, для обеспечения необходимого запаса припуска по коренным и шатунным шейкам поковки необходимо обеспечить стати-

стическую управляемость по всем без исключения выделенным ключевым геометрическим показателям. Для измеренных значений наиме-

нее стабильным является процесс формирования углового отклонения шатунных шеек коленчатого вала и изогнутость по третьей коренной шейке коленчатого вала, поэтому по этим показателям был выполнен дополнительный анализ с применением гистограмм и контрольных карт.

Условия формирования выборки задают выбор наиболее оптимальных контрольных карт. Ими являются парные контрольные карты индивидуальных значений и скользящих размахов. Контрольные границы парных контрольных карт рассчитываются исходя из заранее заданной изменчивости σ_0 . Величина изменчивости определяется исходя из поля допуска показателя качества. Для обеспечения коэффициента стабильности процесса $C_p = 1,33$ поле допуска делится на 8 частей:

$$\sigma_0 = \frac{Td}{8},$$

Td – величина поля допуска рассматриваемого показателя качества, мм.

Заранее заданная величина изменчивости используется для расчета контрольных границ коренных шеек контрольные границы вычисляются в соответствии с ГОСТ Р ИСО 7870-2–2015 по следующим формулам.

Контрольная карта индивидуальных значений

Значение средней линии совпадает с серединой поля допуска:

$$CL = СПД.$$

Значение верхней контрольной границы рассчитывается по формуле

$$UCL = CL + 3\sigma_0.$$

Значение нижней контрольной границы рассчитывается по формуле

$$LCL = CL - 3\sigma_0.$$

Контрольная карта скользящих размахов

Значение средней линии вычисляется по формуле

$$CL = 1,128\sigma_0.$$

Значение верхней контрольной границы вычисляется по формуле

$$UCL = 3,686\sigma_0.$$

Значение нижней контрольной границы совпадает с нулевым значением.

Если значения показателей больше или меньше рассчитанных значений контрольных границ, процесс формирования показателей признается нестабильным и не обеспечивающим необходимый уровень запаса точности. Также о нестабильности процесса свидетельствуют резкие изменения значений показателей, попадающих в зоны, близкие к контрольным границам контрольных карт.

На рисунке 4 приведены гистограммы распределения угловых отклонений шатунных шеек. Для всех шеек форма гистограммы гребенчатая. Для второй и третьей шатунных шеек выявлены несколько центров группирования. Для третьей шатунной шейки центр группирования явно выражен. Имеются выходы значений изогнутости за пределы поля допуска по нижней границе поля допуска.

На рисунке 5 приведены парные контрольные карты изменения угловых отклонений шатунных шеек. Точки всех графиков угловых отклонений всех шатунных шеек выходят как нижние, так и за верхние контрольные границы. Процесс находится в неуправляемом состоянии. Трендов изменения показателя не выявлено. Точки графиков скользящих размахов также выходят за контрольные границы. Процесс находится в неуправляемом состоянии. По данным среднеарифметических значений угловых отклонений, вторая и третья шатунные шейки находятся ниже первой шатунной шейки на 1 мм, вторая – выше на 0,5 мм.

Причиной выявленных отклонений являются технологические факторы процесса калибровки, в результате которых шатунные шейки отклоняются в угловом направлении от номинального их положения. К таким факторам можно отнести остаточные напряжения, износ поверхностей штампов, нестабильность поворота секций выкрутного штампа.

На рисунке 6 приведены гистограммы распределения изогнутости. Гистограмма в угловом положении $135...315^\circ$ – симметричная с выраженным центром группирования; в угловом положении $45...225^\circ$ – гребенчатая без выраженного центра группирования показателя, что свидетельствует о наличии случайных факторов процесса. Выходов значений изогнутости за пределы поля допуска не обнаружено.

На рисунке 7 приведены контрольные карты изменения значений изогнутости третьей шейки коленчатого вала.

Данные графика подтверждают факт худшей стабильности процесса в угловом положении $45...225^\circ$. Точки графика находятся в пределах

контрольных границ. По линейному графику аппроксимирующего значения изогнутости наблюдается нарастание значений изогнутости на 0,4 мм, что связано с износом гравюр штампа в

этой плоскости. Отдельные точки графиков скользящих размахов выходят за контрольные границы. Процесс находится в неуправляемом состоянии.

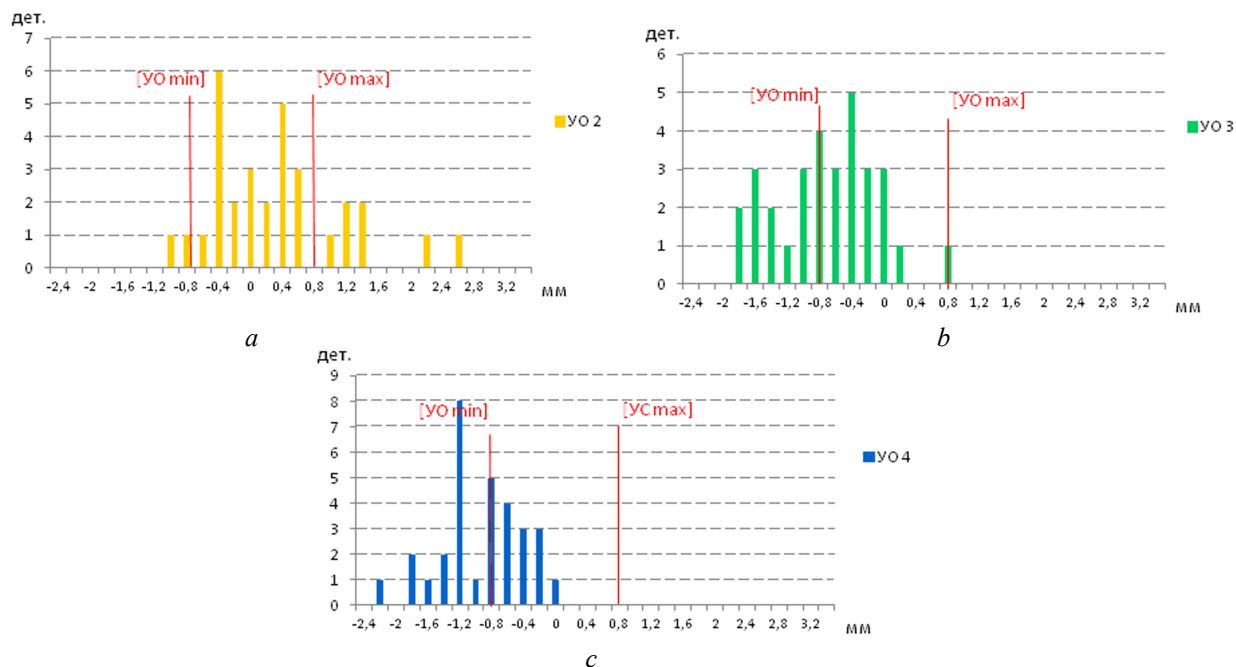


Рис. 4. Гистограммы распределения угловых отклонений шатунных шеек коленчатого вала второй (а), третьей (b) и четвертой (c) шеек

Fig. 4. Histograms of the distribution of angular deviations of the connecting rod necks of the crankshaft the second (a), the third (b) and the fourth neck (c)

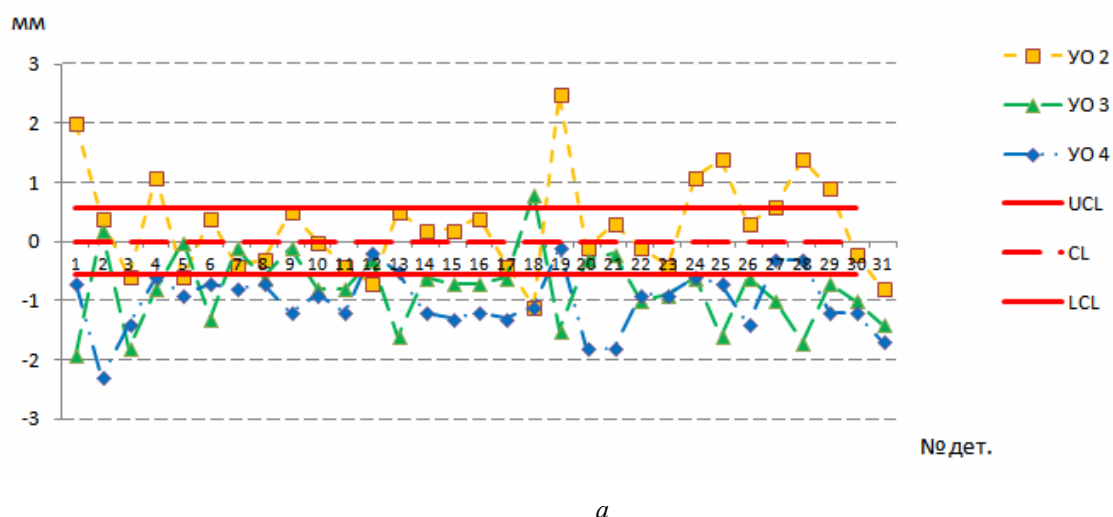
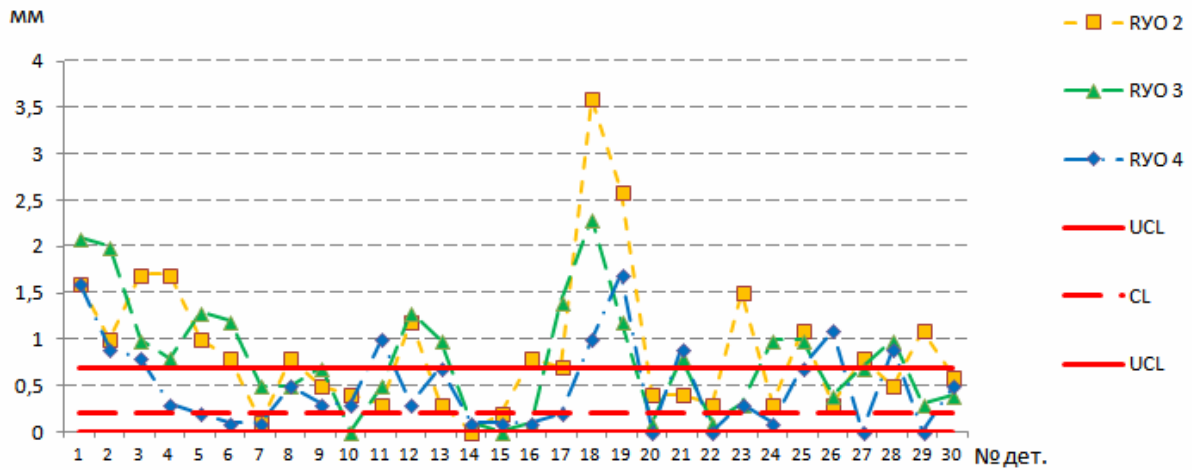


Рис. 5. Парные контрольные карты изменения угловых отклонений шатунных шеек коленчатого вала по технологическому процессу индивидуальных значений (а) (окончание см. на с. 84)

Fig. 5. Paired control maps of changes in angular deviations of the crankshaft connecting rod necks according to the technological process individual values (a) (to be continued on p. 84)



b

Рис. 5 (окончание): скользящих размахов (b)

Fig. 5 (continued): sliding spans (b)

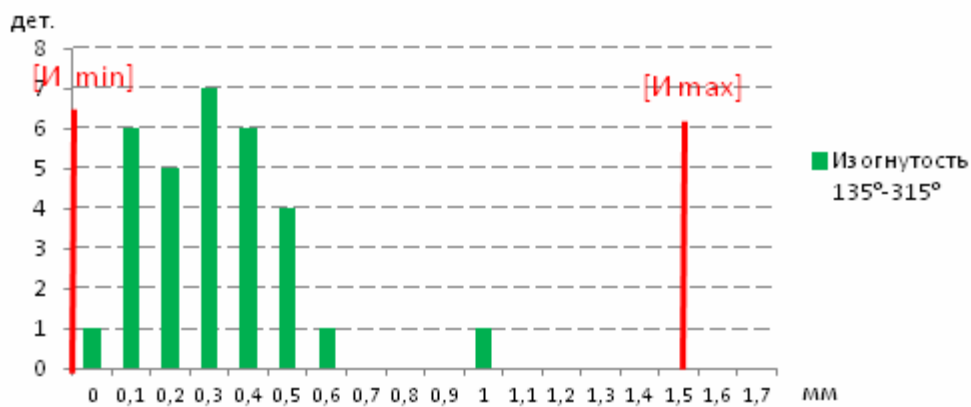
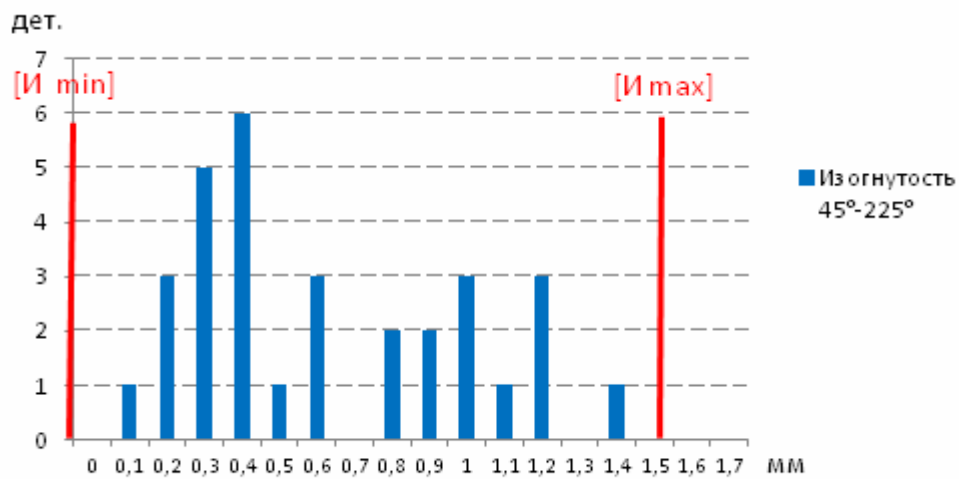
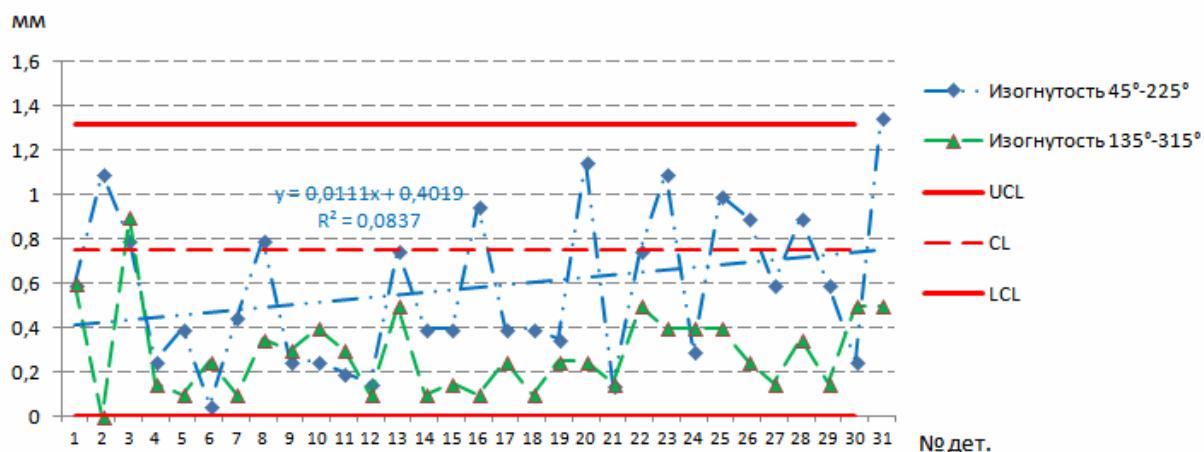
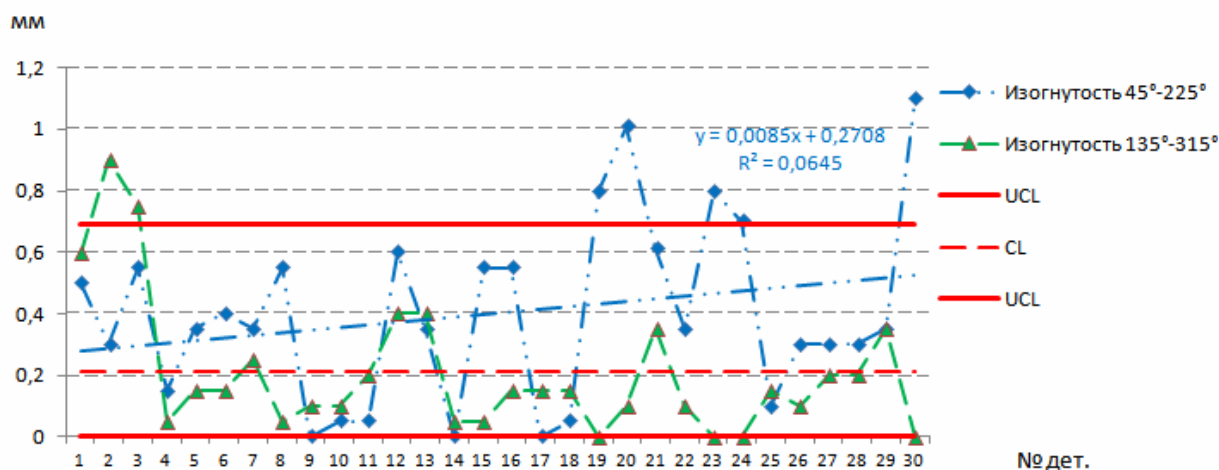


Рис. 6. Гистограммы изогнутости коленчатого вала по третьей коренной шейке поковок коленчатого вала

Fig. 6. Histograms of the curvature of the crankshaft along the third root neck of the crankshaft forgings



a



b

Рис. 7. Парные контрольные карты изменения угловых отклонений шатунных шеек коленчатого вала по технологическому процессу индивидуальных значений (a), скользящих размахов (b)

Fig. 7. Paired control charts of changes in the angular deviations of the connecting rod journals of the crankshaft according to the technological process of individual values (a), sliding ranges (b)

В угловом положении 135...315° график значений изогнутости находится в пределах контрольных границ. Процесс находится в управляемом состоянии. Отдельные точки графика скользящих размахов у поковок коленвалов в начале выборки выходят за контрольные границы, после чего процесс приходит в управляемое состояние. Износ гравюр штампа на изогнутость поковки коленчатого вала не влияет.

Практическая реализация методики

Для улучшения стабильности штамповки по угловым отклонениям выполнена коррекция форм гравюр калибровочных штампов в операции горячей правки (рис. 8).

Главная задача горячей правки – исправление геометрии поковки, искаженной при обреза-

ке облоя и выкрутке шатунных шеек. Правочный штамп работает по принципу локальных деформаций только в тех местах, где требуется корректировка полуфабриката после операции выкрутки шатунных шеек. На рисунке 8 участки правочного штампа, принимающие участие в правке полуфабриката отмечены штриховкой.

Для придания геометрической точности поковок по расположению в пространстве противовесов в гравюре первого и второго переходов горячей правки необходимо в местах, где требуется доворот противовесов и, соответственно, шатунных шеек до номинального расположения, необходимо исключить технологический зазор, предусмотренный для беспрепятственной укладки и выемки поковки из штампа.

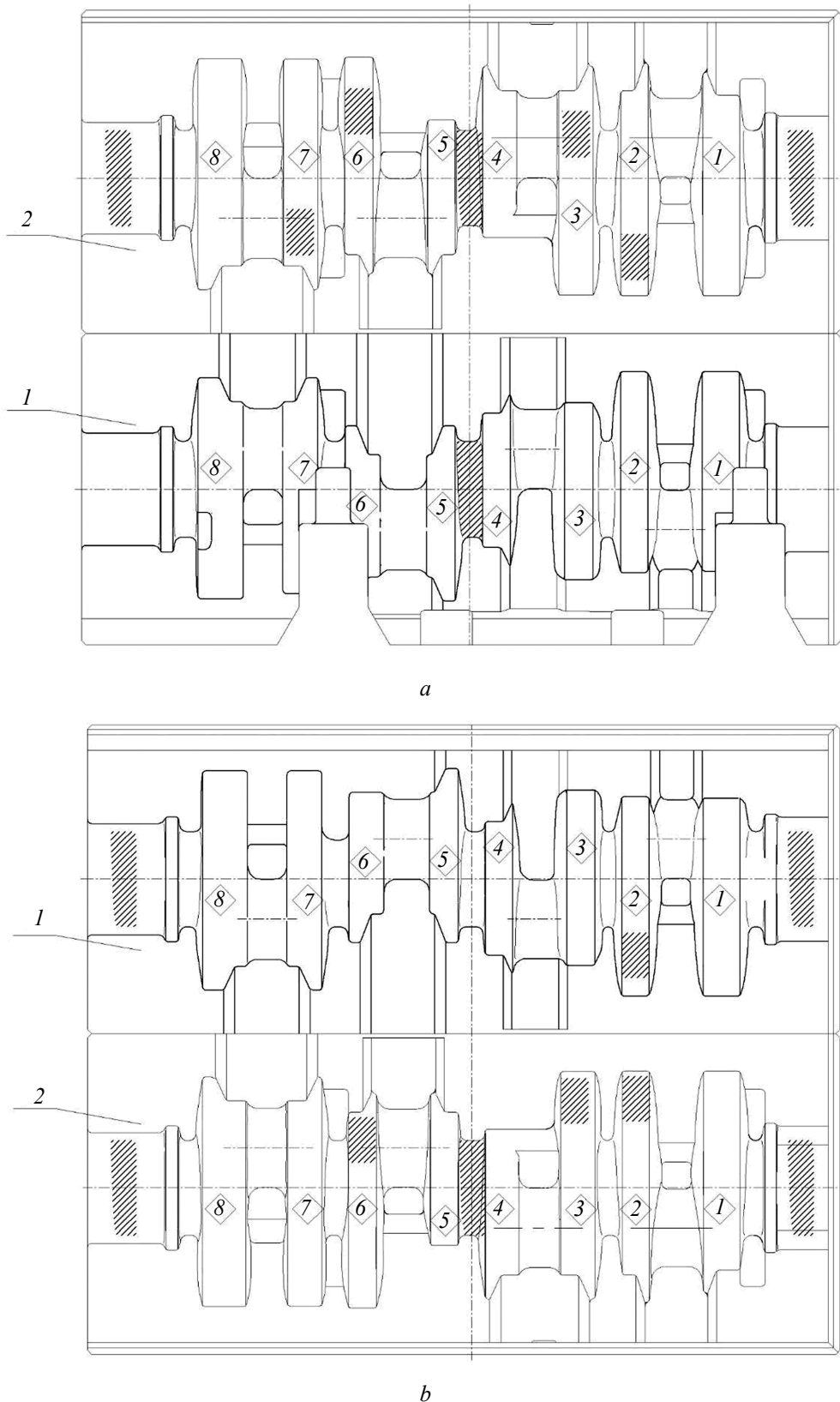


Рис. 8. Локальные изменения в конфигурации правочных штампов: верхняя половина штампа (а): 1 – вставка первого установа; 2 – вставка второго установа правки; нижняя половина штампа (б): 1 – вставка первого установа; 2 – вставка второго установа правки

Fig. 8. Local changes in the configuration of the correction stamps the upper half of the stamp (a): 1 - insert the first setting; 2 - insert the second setting of the edit; the lower half of the stamp (b): 1 - insert the first setting; 2 - insert the second setting of the edit

Поскольку преимущественно третья и четвертая шатунные шейки оказываются ниже первой шатунной шейки, то, соответственно, в верхней части противовесов поковки выпол-

няется освобождение на величину 2 мм, что позволяет изменить их положение после правки.

Пример изменения профиля гравюр штампа для третьего противовеса приведен на рисунке 9, *a, b*.

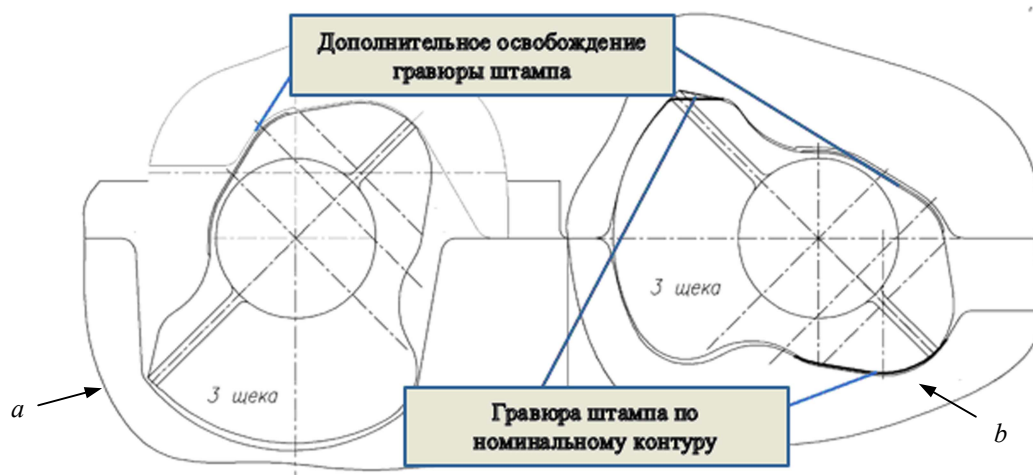


Рис. 9. Конфигурация правочного штампа по 3-му противовесу: первый установ горячей правки (*a*); второй установ горячей правки (*b*)

Fig. 9. Configuration of the correction stamp on the 3rd counterweight: the first hot edit setting (*a*); the second hot edit setting (*b*)

По остальным противовесам в местах штриховки выполняются аналогичные найденные для каждого места освобождения. Перед изготовлением штамповой оснастки изменения гравюр штампа проверены в программном продукте QForm и показали результативность в исправлении коробления коренных шеек коленчатого вала.

Заключение

В результате применения статистических методов выявлены причины нехватки припуска на обрабатываемых шатунных шейках поковки коленчатого вала, заключающиеся в значительном отклонении по второй, третьей и четвертой шатунным шейкам в угловом направлении в диапазоне 0,3...1,7 мм и радиальном направлении в диапазоне 0,5...2 мм. Изменение конфигурации гравюр калибровочных вставок второй и третьей шатунных шеек на 2 мм для компенсации выявленных смещений позволило улучшить стабильность изготовления поволовок коленчатого вала по угловым отклонениям шатунных шеек, а также уменьшить изгиб по третьей коренной шейке, что снизило риски возникновения дефекта черноты по шатунным шейкам поковки коленчатого вала и уменьшило общее коробление поволовок коленчатого вала.

В целом для деталей с повышенным риском сложного пространственного коробления, к ко-

торым можно отнести коленчатые валы, балки, сошки и др., устранение причин коробления на основе статистических методов требует определения перечня единичных геометрических показателей, определяющих сложное пространственное коробление, одновременное измерение этих показателей партии поволовок в периоде стойкости штамповой оснастки с расчетом значений статистических показателей и последующим инженерным анализом командой специалистов – технологами и конструкторами, ведущими в производстве рассматриваемую деталь.

Библиографические ссылки

1. Solanki A., Sonigra S., Vajpayee V. Implementation of quality tools and effective strategies to boost production market standards for forged crankshafts: A case study of forging industry. *Paper presented at the Materials Today*, 2021, 47, 5970-5976. doi: 10.1016/j.matpr.2021.04.537.
2. Wang X., Qi Z., Chen K., Liu Y., Wang E. Study on the forming accuracy of the three-cylinder crankshaft using a specific die with a preformed dressing. *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 2019, 104, 551-564. doi: 10.1007/s00170-019-03909-6.
3. Kandrotaitė Janutienė R., Mažeika D. Modelling of induction heating of steel work piece for forging of crankshaft. *Medziagotyra*, 2018, 24, 345-350. doi: 10.5755/j01.ms.24.3.18313.

4. Karthik S., Silksonjohn J. A case study of 5s implementation in inspection process. *International Journal of Mechanical and Production Engineering Research and Development*, 2019, 9, 1469-1476. doi: 10.24247/ijmperdjun2019154.

5. Noorbakhsh M., Moradi H. Design and optimization of multi-stage manufacturing process of stirling engine crankshaft. *SN Applied Sciences*, 2020, 2. doi: 10.1007/s42452-019-1820-6.

6. Hamrle P., Hlaváč J. Load analysis of crankshaft of two-point crank press. Paper presented at the Annals of DAAAM and Proceedings of the International DAAAM Symposium, 2018, 29, 0601-0608. doi: 10.2507/29th.daaam.proceedings.087.

7. Lu J., Cheng G., Wu M., Yang G., Che J. Detection and analysis of magnetic particle testing defects on heavy truck crankshaft manufactured by microalloyed medium-carbon forging steel. *Journal of Iron and Steel Research International*, 2020, 27, 608-616. doi: 10.1007/s42243-019-00334-7.

8. Zhao F., Zhang Z., Liu Y., Zhang Z., Xie J. The coarse microstructure of medium-carbon microalloyed steel crankshafts: Formation mechanism and finish forging control. *Steel Research International*, 2020, 91. doi: 10.1002/srin.201900572.

9. Jiang B., Dong Z., Yang Z., Zhou L., Liu Y., Wang Y. Analysis of the formation of surface crack on crankshaft after die forging. *Transactions of the Indian Institute of Metals*, 2015, 68, 553-559. doi: 10.1007/s12666-014-0485-5.

10. 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.

11. Мартюгин А. В., Володин И. М. Анализ результатов исследования дисбаланса поковок коленчатых валов с использованием нейросети // *Colloquium-journal*. 2019. № 26 (50). С. 89–94.

12. Касьянов С. В., Карлова Т. В. Жизненный цикл деталей машины как непрерывный поток технологий // *Вестник Брянского государственного технического университета*. 2019. № 7 (80). С. 18–22.

13. Особенности проектирования технологических процессов горячей объемной штамповки с оригинальными требованиями к качеству поковок / А. В. Мартюгин, И. М. Володин, А. И. Володин, Г. Ф. Биктимирова // *Современные наукоемкие технологии*. 2019. № 4. С. 41–49.

14. Мартюгин А. В., Володин И. М., Володин А. И., Биктимирова Г. Ф. Совершенствование метода проектирования технологических процессов горячей объемной штамповки коленчатых валов с необрабатываемыми противовесами // *Известия ТулГУ. Технические науки*. 2020. № 6. С. 364–371.

15. Касьянов С. В., Могилевец В. Д. Производство автомобильной техники: информационно-технологическое сопровождение // *Компетентность*. 2021. № 3. С. 45–49.

16. Ермачков Р. О., Вяткин А. Г. Влияние способов наладки технологической системы на точность высот-

ных размеров при осадке на гидравлическом прессе // *Наука, техника и образование*. 2019. № 2 (24). С. 16–24.

17. Антонюк Ф. И., Кузнецов И. В., Сорокин П. С., Ермачков Р. О. Технологические факторы повышения точности диаметральных размеров штучных (мерных) заготовок, изготавливаемых холодной осадкой // *Современные наукоемкие технологии*. 2018. № 7. С. 14–19.

18. САПР. Расчет припусков для механической обработки поверхностей деталей и определения размеров заготовок. Метод. Рекомендации МР 106-84. М.: ВНИИНМАШ, 1984 32 с.

19. Кузгаильдин Р. С., Шутова Л. А. Повышение стойкости штампов для горячего деформирования // *Социально-экономические и технические системы: исследование, проектирование, оптимизация*. 2019. № 1 (80). С. 50–58.

20. Никушкин А. Е. Влияние трения на нагрузку и износ инструмента при объемной штамповке // *Известия Тульского государственного университета. Технические науки*. 2020. № 12. С. 581-584

References

1. Solanki A., Sonigra S., Vajpayee V. Implementation of quality tools and effective strategies to boost production market standards for forged crankshafts: A case study of forging industry. *Paper presented at the Materials Today*, 2021, 47, 5970-5976. doi: 10.1016/j.matpr.2021.04.537.

2. Wang X., Qi Z., Chen K., Liu Y., Wang E. Study on the forming accuracy of the three-cylinder crankshaft using a specific die with a preformed dressing. *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 2019, 104, 551-564. doi: 10.1007/s00170-019-03909-6.

3. Kandrotaitė Janutienė R., Mažeika D. Modelling of induction heating of steel work piece for forging of crankshaft. *Medziagotyra*, 2018, 24, 345-350. doi: 10.5755/j01.ms.24.3.18313.

4. Karthik S., Silksonjohn J. A case study of 5s implementation in inspection process. *International Journal of Mechanical and Production Engineering Research and Development*, 2019, 9, 1469-1476. doi: 10.24247/ijmperdjun2019154.

5. Noorbakhsh M., Moradi H. Design and optimization of multi-stage manufacturing process of stirling engine crankshaft. *SN Applied Sciences*, 2020, 2. doi: 10.1007/s42452-019-1820-6.

6. Hamrle P., Hlaváč J. Load analysis of crankshaft of two-point crank press. Paper presented at the Annals of DAAAM and Proceedings of the International DAAAM Symposium, 2018, 29, 0601-0608. doi: 10.2507/29th.daaam.proceedings.087.

7. Lu J., Cheng G., Wu M., Yang G., Che J. Detection and analysis of magnetic particle testing defects on heavy truck crankshaft manufactured by microalloyed medium-carbon forging steel. *Journal of Iron and Steel Research International*, 2020, 27, 608-616. doi: 10.1007/s42243-019-00334-7.

8. Zhao F., Zhang Z., Liu Y., Zhang Z., Xie J. The coarse microstructure of medium-carbon microalloyed steel crankshafts: Formation mechanism and finish forging control. *Steel Research International*, 2020, 91. doi: 10.1002/srin.201900572.
9. Jiang B., Dong Z., Yang Z., Zhou L., Liu Y., Wang, Y. Analysis of the formation of surface crack on crankshaft after die forging. *Transactions of the Indian Institute of Metals*, 2015, 68, 553-559. doi: 10.1007/s12666-014-0485-5.
10. Martyugin A.V., Volodin I.M. [Reducing the effect of deformation when cutting burrs on the geometrical accuracy and the imbalance of forgings crankshaft]. *Colloquium-journal*, 2019, no. 26-2, pp. 91-94 (in Russ.).
11. Martyugin A.V., Volodin I.M. [Analysis of the research results in the imbalance of forgings crankshaft using neural networks]. *Colloquium-journal*, 2019, no. 26, pp. 89-94 (in Russ.).
12. Kasyanov S.V., Karlova T.V. [The life cycle of machine parts as a continuous flow of technologies]. *Vestnik Bryanskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta*, 2019, no. 7, pp. 18-22 (in Russ.).
13. Martyugin A.V., Volodin I.M., Volodin A.I., Biktimirova G.F. [Features of designing technological processes of hot volumetric stamping with original requirements for the quality of forgings]. *Sovremennye naukoemkie tekhnologii*, 2019, no. 4, pp. 41-49 (in Russ.).
14. Martyugin A.V., Volodin I.M., Volodin A.I., Biktimirova G.F. [Improvement of the method of designing technological processes of hot volumetric stamping of crankshafts with unprocessed counterweights]. *Izvestiya TulGU. Tekhnicheskie nauki*, 2020, no. 6, pp. 364-371 (in Russ.).
15. Kasyanov S.V., Mogilevets V.D. [Production of automotive equipment: information and technological support]. *Kompetentnost'*, 2021, no. 3, pp. 45-49 (in Russ.).
16. Ermachkov R.O., Vyatkin A.G. [The influence of technological system adjustment methods on the accuracy of height dimensions during precipitation on a hydraulic press]. *Nauka, tekhnika i obrazovanie*, 2019, no. 2, pp. 16-24 (in Russ.).
17. Antonyuk F.I., Kuznetsov I.V., Sorokin P.S., Ermachkov R.O. [Technological factors of increasing the accuracy of the diametrical dimensions of piece (dimensional) blanks made by cold draft]. *Sovremennye naukoemkie tekhnologii*, 2018, no. 7, pp. 14-19 (in Russ.).
18. SAPR. *Raschet pripuskov dlya mekhanicheskoi obrabotki poverkhnostei detalei i opredeleniya razmerov zagotovok. Metod. Rekomendatsii MR 106-84* [CAD. Calculation of allowances for machining the surfaces of parts and determining the dimensions of workpieces. Method. Recommendations of MR 106-84]. Moscow, VNIINMASH, 1984, 32 p. (in Russ.).
19. Kuzhagildin R.S., Shutova L.A. [Increasing the resistance of stamps for hot deformation]. *Sotsial'no-ekonomicheskie i tekhnicheskie sistemy: issledovanie, proektirovanie, optimizatsiya*, 2019, no. 1, pp. 50-58 (in Russ.).
20. Nikishkin A.E. [The effect of friction on the load and wear of the tool during volumetric stamping]. *Izvestiya Tul'skogo gosudarstvennogo universiteta. Tekhnicheskie nauki*, 2020, no. 12, pp. 581-584 (in Russ.).

Reduction of Complex Spatial Warping of Crankshaft Forgings to Ensure Guaranteed Allowance for Root and Connecting Rod Necks

A.V. Czech, Forge Plant of KAMAZ PJSC, Naberezhnye Chelny, Russia

D.T. Safarov, PhD in Engineering, Associate Professor, Naberezhnye Chelny Institute of Kazan (Volga Region) Federal University, Naberezhnye Chelny, Russia

In the article, from the total set of dimensions of the crankshaft forgings, geometric accuracy indicators reflecting their complex spatial warping – the diametrical dimensions of the root and connecting rod necks, angular deviations of the connecting rod necks, the curvature of the third root neck, transverse displacement along the die line – are highlighted. To estimate the value of spatial warping according to the selected accuracy indicators during the period of durability of the engravings of die inserts, a batch of crankshaft forgings was measured, followed by probabilistic and statistical analysis in the form of plotting histograms of distributions, normal distribution curves and Shewhart charts.

On the basis of the obtained statistical data of value variability, a combination of their values is considered, leading to scrap of crankshaft forging connecting rod necks in the form of defects caused by forging under-allowance or non-straightness after mechanical processing. Under-allowance for root and connecting rod necks occurs at minimum values of diametrical dimensions and maximum values of angular size deviations, non-straightness along the third root neck and transverse displacement along the die line. It was found that the diametrical dimensions of the root necks range up to 4 mm; for the first, second and the third neck it ranges up to 2 mm, for the second neck - up to 4 mm. To prevent under-allowance, the adjustment is carried out along the upper limit of the tolerance. The range of forging lateral displacements along the die line is up to 0.6 mm, that is close to the upper limit of the tolerance. The curvature of the forging found in different mutually perpendicular directions varies. For the first installation of correction operation is up to 1 mm, for the second installation it is up to 1.5 mm, which requires improvements. The most unstable indicator of the connecting-rod neck relative position is the deviation of their angular position, reaching values up to 2 mm of their positive and negative values.

A technical solution for the local modification of the engraving profiles of die inserts for hot forging correction, allowing to improve the calibration scheme of the crankshaft forging and enhance stability of the crankshaft forging manufacture by angular deviations of the connecting rod necks, as well as to reduce bending along the third root neck is considered.

Keywords: forging of the crankshaft, hot forging, statistical control methods, allowance indicators, root and connecting rod necks.

Получено 24.12.2021

Образец цитирования

Чех А. В., Сафаров Д. Т. Уменьшение сложного пространственного коробления поковок коленчатых валов для обеспечения гарантированного припуска по коренным и шатунным шейкам // Вестник ИжГТУ имени М. Т. Калашникова. 2022. Т. 25, № 1. С. 77–90. DOI: 10.22213/2413-1172-2022-1-77-90.

For Citation

Chekh A.V., Safarov D.T. [Reduction of Complex Spatial Warping of Crankshaft Forgings to Ensure Guaranteed Allowance for Root and Connecting Rod Necks]. *Vestnik IzhGTU imeni M.T. Kalashnikova*, 2022, vol. 25, no. 1, pp. 77-90 (in Russ.). DOI: 10.22213/2413-1172-2022-1-77-90.