

ISSN 1995-2732 (Print), 2412-9003 (Online)
УДК 621.97.042
DOI: 10.18503/1995-2732-2022-20-1-83-94



ИДЕНТИФИКАЦИЯ НАЛАДОЧНЫХ СМЕЩЕНИЙ ШТАМПОВОГО ОБОРУДОВАНИЯ ДЛЯ УПРАВЛЕНИЯ ГЕОМЕТРИЧЕСКОЙ ТОЧНОСТЬЮ ПОКОВОК КОЛЕНЧАТЫХ ВАЛОВ БОЛЬШЕГРУЗНЫХ АВТОМОБИЛЕЙ

Сафаров Д.Т.¹, Чех А.В.²

¹Набережночелнинский институт (филиал) Казанского (Приволжского) федерального университета, Набережные Челны, Россия

²Кузнецкий завод ПАО «Камский автомобильный завод», Набережные Челны, Россия

Аннотация. Постановка задачи (актуальность работы). Разработанная авторами методика нахождения параметров распределения припуска по коренным и шатунным шейкам поковки коленчатого вала большегрузного автомобиля позволяет эффективно контролировать партии поковок коленчатого вала большегрузных автомобилей, а также выявлять поковки, годные по отдельным геометрическим показателям, но не обеспечивающие припуск по шатунным шейкам коленчатого вала. Разработанная методика имеет больший потенциал в части не только контроля, но и управления геометрической точностью поковок в операциях изготовления поковок на автоматической линии горячей объемной штамповки, для чего необходимо получить математические модели, обеспечивающие возможность управления геометрическими параметрами поковки коленчатого вала. **Используемые методы.** Математические методы аппроксимации экспериментальных графиков степенными функциями. **Новизна.** Впервые разработана методика диагностирования наладок штамповочного оборудования, связывающая наладочные смещения штамповочного оборудования автоматической линии горячей объемной штамповки и показатели распределения припуска по коренным и шатунным шейкам поковок коленчатых валов большегрузных автомобилей. **Результаты.** Впервые получены математические модели, связывающие наладочные параметры штамповочного оборудования автоматической линии с параметрами распределений припуска по коренным и шатунным шейкам поковок коленчатых валов большегрузных автомобилей. **Практическая значимость.** Обеспечение возможности управления параметрами припуска по коренным и шатунным шейкам поковки в зависимости от параметров наладки и фактического технического состояния штамповочного оборудования автоматической линии горячей объемной штамповки поковок коленчатых валов большегрузных автомобилей.

Ключевые слова: поковка коленчатого вала, горячая объемная штамповка, параметры распределения припуска, коренные и шатунные шейки, наладочные смещения штамповочного оборудования.

© Сафаров Д.Т., Чех А.В., 2022

Для цитирования

Сафаров Д.Т., Чех А.В. Идентификация наладочных смещений штамповочного оборудования для управления геометрической точностью поковок коленчатых валов большегрузных автомобилей // Вестник Магнитогорского государственного технического университета им. Г.И. Носова. 2022. Т. 20. №1. С. 83–94. <https://doi.org/10.18503/1995-2732-2022-20-1-83-94>



Контент доступен под лицензией Creative Commons Attribution 4.0 License.
The content is available under Creative Commons Attribution 4.0 License.

IDENTIFYING ADJUSTMENT OFFSETS OF METAL-FORMING EQUIPMENT TO CONTROL GEOMETRICAL ACCURACY OF CRANKSHAFT FORGINGS FOR HEAVY TRUCKS

Safarov D.T.¹, Chekh A.V.²

¹Naberezhnye Chelny Institute (branch) of Kazan (Volga Region) Federal University, Naberezhnye Chelny, Russia

²Forging Plant of PJSC Kama Automobile Plant, Naberezhnye Chelny, Russia

Abstract. **Problem Statement (Relevance).** The method, developed by the authors for determining the parameters of the allowance distribution along main and connecting rod journals of a crankshaft forging for a heavy truck, contributes to efficient control of batches of crankshaft forgings for heavy trucks and identification of forgings that are acceptable for individual geometric parameters, but fail to provide an allowance for connecting rod journals of the crankshaft. The developed technique has a greater potential in terms of not only monitoring, but also control of the geometrical accuracy of forgings in the operations of manufacturing forgings on an automatic hot forging line. Therefore, mathematical models should be designed to control the geometric parameters of the crankshaft forging. **Methods Applied.** Mathematical methods of approximation of experimental graphs by power functions. **Originality.** For the first time, a technique has been developed to diagnose the adjustment of metal-forming equipment, correlating the adjustment offsets of metal-forming equipment of the automatic hot forging line and allowance distribution indicators for main and connecting rod journals of crankshaft forgings for heavy trucks. **Results.** For the first time, the authors developed the mathematical models, correlating the adjustment parameters of metal-forming equipment of the automatic line and allowance distribution parameters for main and connecting rod journals of crankshaft forgings for heavy trucks. **Practical Relevance.** It lies in providing control of the parameters of the allowance for main and connecting rod journals of forgings, depending on the adjustment parameters and an actual technical condition of the metal-forming equipment of the automatic hot forging line for crankshaft forgings for heavy trucks.

Keywords: crankshaft forging, hot forging, allowance distribution parameters, main and connecting rod journals, adjustment offsets of metal-forming equipment.

For citation

Safarov D.T., Chekh A.V. Identifying Adjustment Offsets of Metal-Forming Equipment to Control Geometrical Accuracy of Crankshaft Forgings for Heavy Trucks. *Vestnik Magnitogorskogo Gosudarstvennogo Tekhnicheskogo Universiteta im. G.I. Nosova* [Vestnik of Nosov Magnitogorsk State Technical University]. 2022, vol. 20, no. 1, pp. 83–94. <https://doi.org/10.18503/1995-2732-2022-20-1-83-94>

Введение

Поковки коленчатых валов большегрузных автомобилей изготавливаются в технологическом маршруте, включающем операции транспортирования, нагрева, горячей пластической деформации материала заготовки, термической обработки. Каждая из перечисленных операций вносит свои отклонения в изготавливаемый полуфабрикат поковок, наиболее значимыми являются операции горячей пластической деформации. К ним относятся операции вальцовки, штамповки, вырубки, выкрутки и правки.

В настоящее время имеются достаточно подробные исследования различных факторов, действующих в процессах штамповки поковок коленчатых валов – деформаций и коробления поковок, обеспечения балансируемости и износа штампо-

вой оснастки [1–9]. В настоящее время исследования по влиянию выполнения наладочных смещений на геометрические параметры штамповки поковок коленчатых валов большегрузных автомобилей не выявлено. В процессе горячей объемной штамповки поковок действуют производственные факторы, влияющие на геометрические параметры поковки коленчатого вала. К ним можно отнести фактор нагрева или охлаждения штамповой оснастки и полуфабриката, износ штампов в операциях штамповки, вырубки и правки, наличия смазочного материала в ручьях штамповочного штампа, наличие или отсутствие окалины в ручьях штампов штамповки и правки, стабильность срабатывания укладчиков поковок в штамповую оснастку, перекладку и транспортирование и т.д.

Наладчики автоматической линии обеспечивают регулирование наладочных параметров про-

цесса горячей объемной штамповки по изменению закрытой высоты штампа, параметров продольных и поперечных смещений верхних и нижних вставок штамповочного пресса, регулировку угла выкрутки, доработку гравюр штампов в первом и втором установе правочной операции, а также своевременную смазку и отсутствие окалины в ручьях штампов. Величина и своевременность выполнения наладочных смещений зависит от квалификации наладчиков автоматической линии, а следовательно, и геометрической точности изготавливаемых партий поковок коленчатых валов.

Регулировка геометрических параметров поковки выполняется по данным измерений поковки контролерами ОТК. Контролеры в соответствии с картой разметок измеряют геометрические параметры поковки коленчатого вала: диаметральные размеры коренных и шатунных шеек, угловые отклонения шатунных шеек, изгиб по третьей коренной шейке в двух плоскостях, продольные и поперечные смещения по разъему штампа, высотные размеры противовесов и т.д. Данные измерений они сообщают наладчикам, которые выявляют в них отклонения и принимают экспертные решения о необходимости тех или иных наладочных смещений штампового оборудования для обеспечения соответствия геометрических параметров партий изготавливаемых поковок коленчатых валов.

Изменение наладочных смещений штампового оборудования – ковочного и правочного пресса – одновременно изменяет значения всех контроли-

руемых геометрических показателей точности поковки. Заранее точно предсказать, как изменится весь комплекс показателей практически невозможно. Поэтому предложено обеспечить регулирование процесса штамповки по всем операциям технологического маршрута не по отдельным геометрическим показателям точности – диаметральным размерам коренных и шатунных шеек, отклонениям их углового положения, изогнутости поковки по третьей коренной шейке и т.д., а по интегральному показателю точности поковки коленчатого вала – распределению припуска по коренным и шатунным шейкам. Этот показатель обеспечивает ожидаемую потребителем точность поковки коленчатого вала при любом сочетании отдельных метрологических показателей точности поковки.

Полученные результаты и их обсуждение

Для обеспечения регулирования процесса авторами статьи разработана методика координатных цеховых измерений поковки коленчатого вала и расчета припуска, а также программный продукт, автоматизирующий процессы расчета и вывода данных в виде визуальной формы, позволяющей проанализировать распределение припуска. Измерения выполняются на разработанном специализированном контрольном приспособлении, конструкция которого позволяет выполнять измерение высотных размеров поковки коленчатого вала строго в заданных угловых фазах (**рис. 1**).

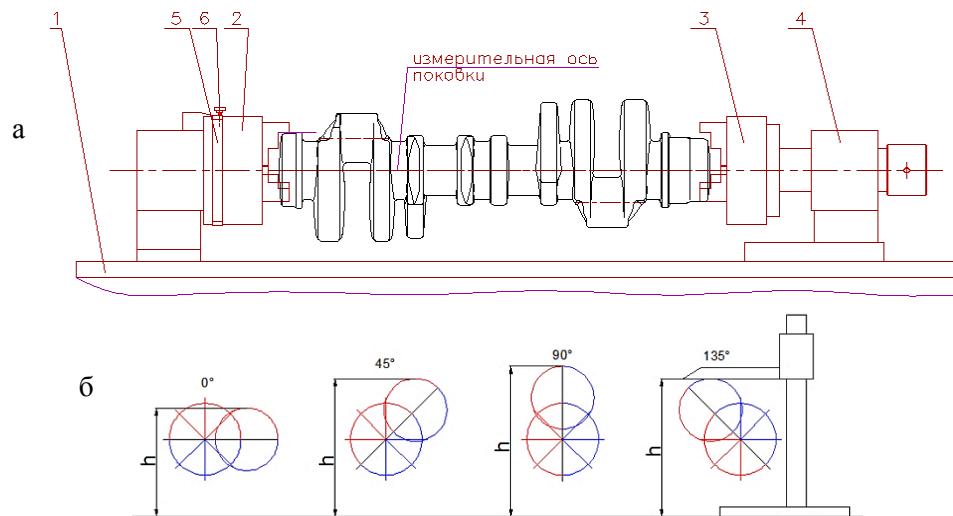


Рис. 1. Контрольное приспособление координатных измерений высотных параметров: а – конструкция приспособления: 1 – станина; 2, 3 – патрон самоцентрирующий; 4 – корпус; 5 – угловой вращающийся лимб; 6 – стопорный винт лимба; б – пример последовательности измерений высотных параметров в различных угловых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

Fig. 1. Control device for coordinate measurements of height parameters: a is design of the device: 1 is a frame; 2, 3 is a self-centering cartridge; 4 is a housing; 5 is an angular rotating limb; 6 is a locking screw of the limb; b is an example of a sequence of measurements of height parameters in various angular phases

Угловой шаг задается условиями базирования поковки в самоцентрирующих призмах во фрезерно-центровальной операции, а также угловыми фазами часто возникающих дефектов в виде черноты после механической обработки поковок после операции охватывающего фрезерования (рис. 2) и выполняется через 45°.

На рис. 3 приведен пример графической формы распределения припуска по данным измерений поковки коленчатого вала контролерами ОТК. По первой, третьей и четвертой шатунной, а также по третьей коренной шейке в отдельных угловых фазах имеется недостаточность припуска, выделенная на круговых диаграммах красным цветом. Поскольку наладчики принимают решение об изменении наладочных параметров экспертино, на основании опыта штамповки, уверенности в результативности предпринятых корректирующих действий нет. Возникает необходимость в разработке механизма, позволяющего выявить влияние каждого из наладочных смещений штамповочного оборудования на величину распределение припуска.

Для реализации указанной выше потребности разработан механизм диагностирования наладочных смещений, позволяющий найти необходимые математические зависимости. На рис. 4 приведена схема диагностирования наладочных смещений по изменению закрытой высоты штампа ковочного пресса на штамповочной операции. Сначала выполняется штамповка по-

ковки в автоматическом режиме без изменения наладочных смещений, после чего выполняется наладка с изучаемым наладочным смещением. Проводятся измерения двух поковок коленчатого вала с заполнением карт разметок 1 и 2 (рис. 5). Данные карт разметок анализируются и определяется математическая модель изменения отклонений профиля шеек коленчатого вала от минимальной границы припуска.

На втором этапе процесс штамповки повторяется, после чего математические модели двух наладок сравниваются. При совпадении или незначительном различии математических моделей отклонений их используют для математической коррекции припуска в процессе поиска значений наладочных смещений. В случае значительного расхождения полученных значений припусков инициируется еще одна наладка. Если и в процессе ее выполнения закономерность не выявляется, то выполняется поиск причин отсутствия стабильности значений и ее устранение.

Как видим, для каждой коренной и шатунной шейки изменения припуска индивидуальны, их изменение зависит от множества технологических факторов, действующих операций вальцовки, штамповки, обрезки, выкрутки и правки – индивидуального износа штамповочного оборудования, температурных изменений, износа ручьев штамповочного и калибровочного штампов, жесткости прессового оборудования и т.д.

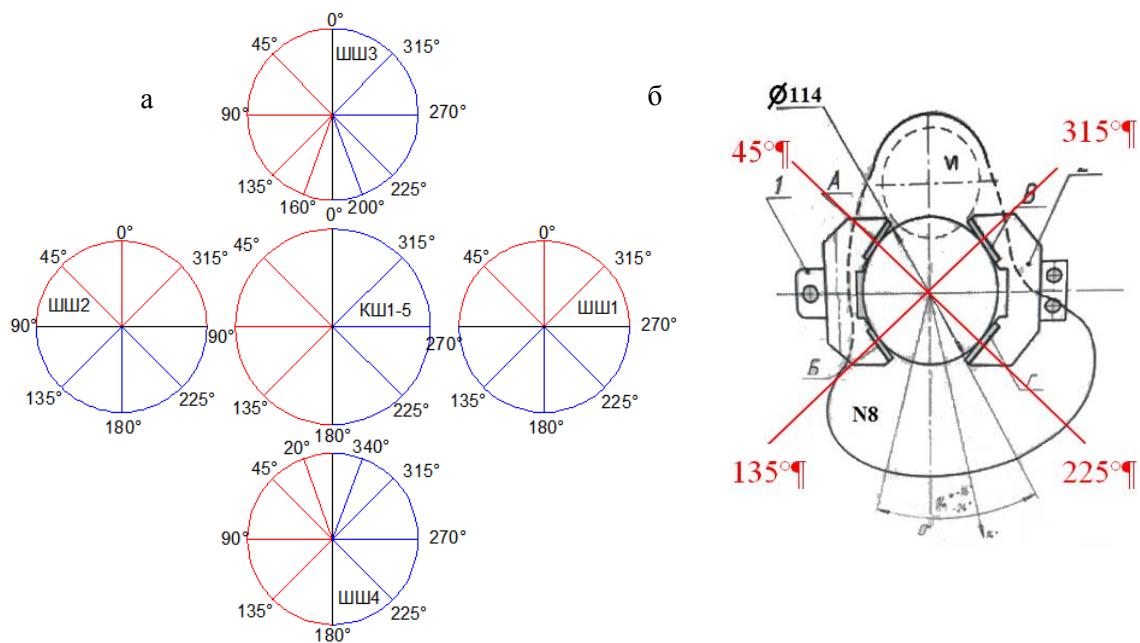


Рис. 2. Координаты точек измерений коренных и шатунных шеек поковки коленчатого вала:
а – угловые фазы измерений; б – схема базирования поковки на фрезерно-центровальной операции
Fig. 2. Coordinates of the measurement points of the main and connecting rod journals of the crankshaft forging:
a are angular phases of measurements; б is a scheme of basing the forging on the milling-centering operation

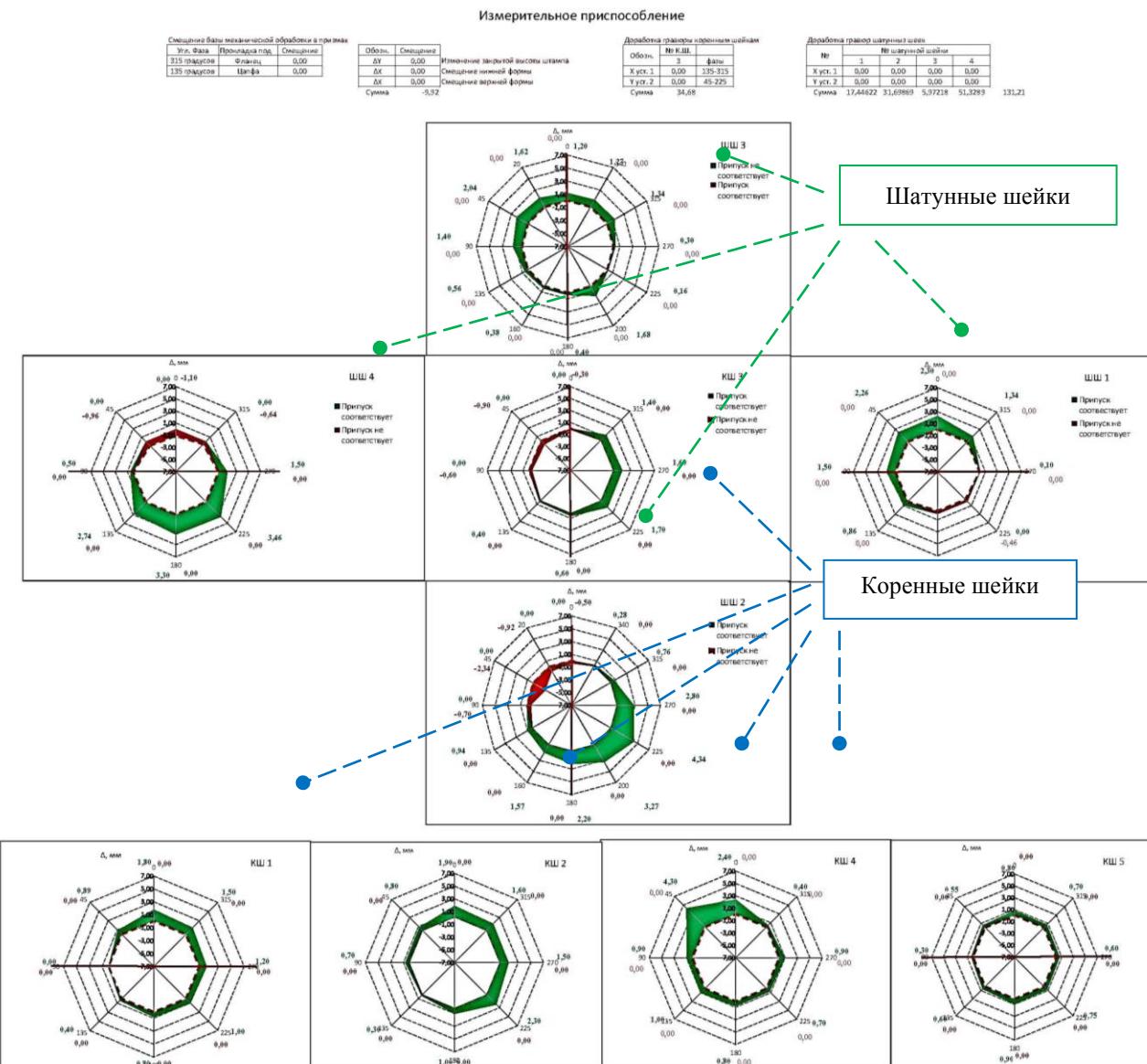


Рис. 3. Исходные диаграммы распределения припуска по коренным и шатунным шейкам поковки коленчатого вала

Fig. 3. Original diagrams of the allowance distribution along the main and connecting rod journals of the crankshaft forging

Учесть их изменение в процессах математического моделирования, например в программных продуктах QForm [10–13] и других аналогичных системах автоматизированного конструкторского проектирования поковок, невозможно.

Для того чтобы определить действующие законы изменения припусков по коренным и шатунным шейкам, необходимо найти их разность в наладках 1 и 2, 3 и 4, выполненных с одними и теми же наладочными смещениями.

Например, для нулевой угловой фазы эта разность находится по следующей формуле:

$$\Delta_0 = \delta_{0_2} - \delta_{0_1}, \quad (1)$$

где δ_{0_2} – отклонение профиля в нулевой измерительной фазе от границы минимального припуска во второй наладке, мм; δ_{0_1} – отклонение профиля в нулевой измерительной фазе от границы минимального припуска в первой наладке, мм.

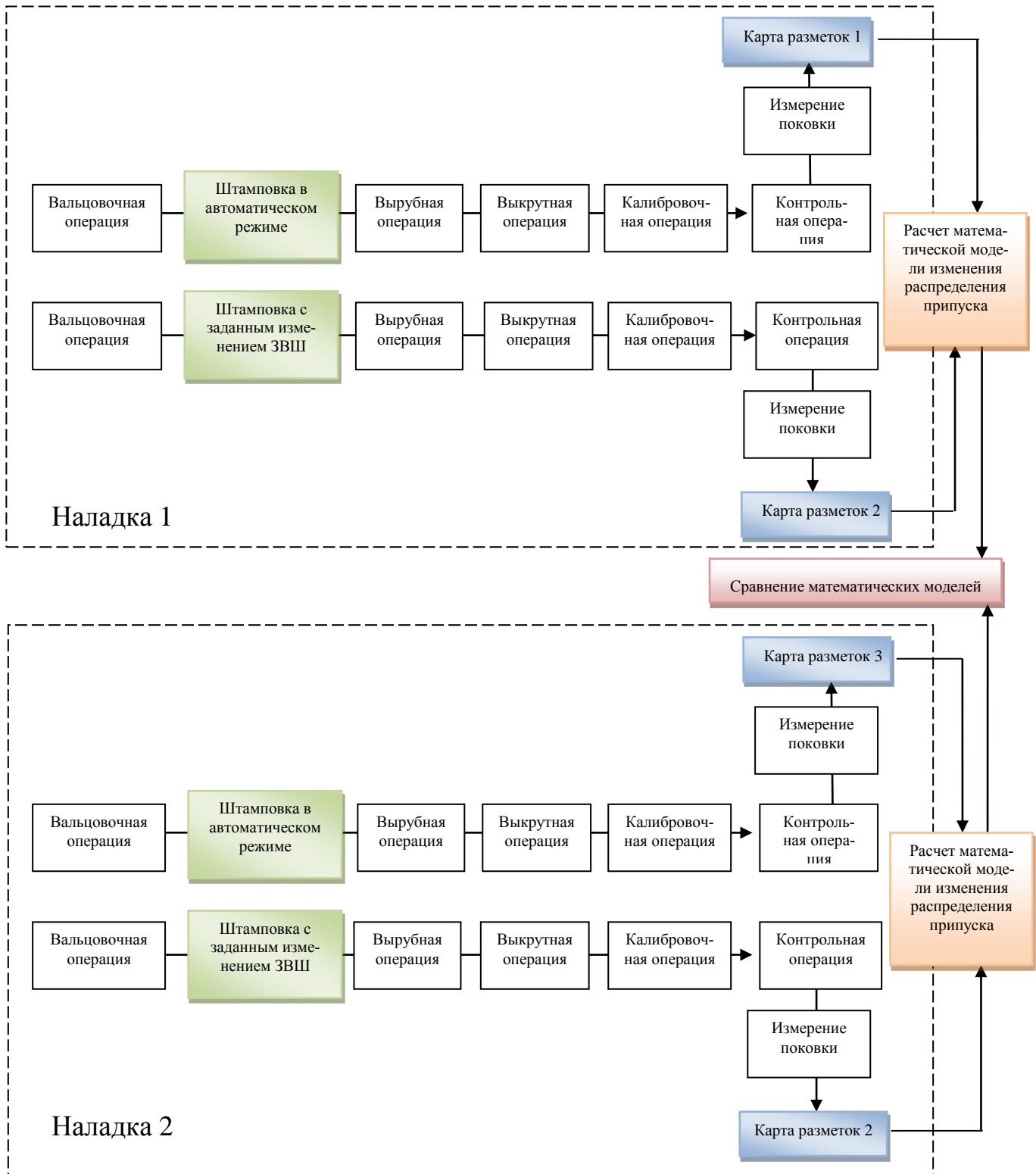


Рис. 4. Схема выполнения диагностики наладки штамповочного оборудования по изменению закрытой высоты штампа

Fig. 4. Diagnostics of the adjustment of metal-forming equipment to change shut height of the die

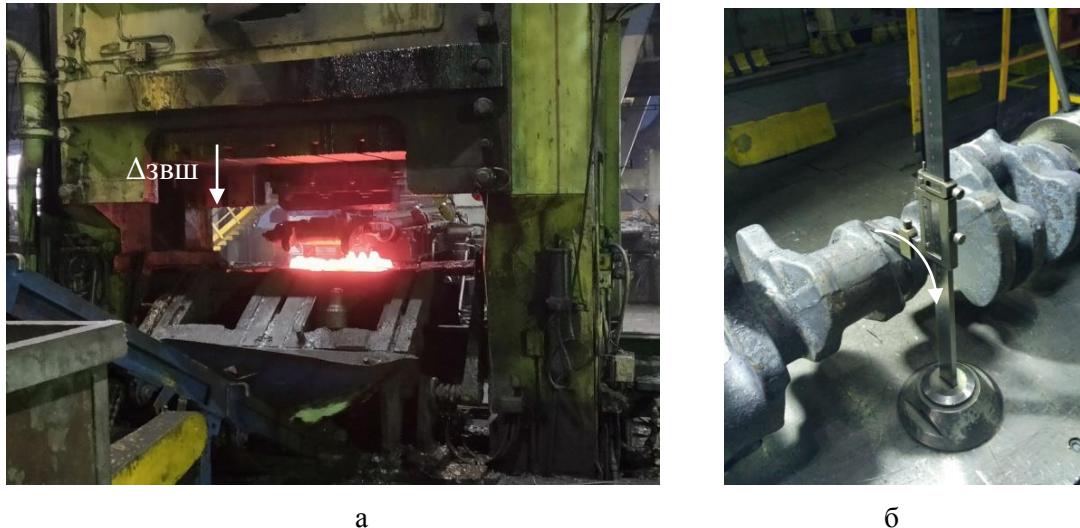


Рис. 5. Процесс выполнения наладки: а – процесс штамповки поковок коленчатых валов; б – измерения поковки коленчатого вала

Fig. 5. The adjustment process: a is a process of stamping the crankshaft forgings; b are measurements of the crankshaft forging

Для угловой фазы 45° эта разность находится по следующей формуле:

$$\Delta_{45} = \delta_{45_2} - \delta_{45_1}, \quad (2)$$

где δ_{45_2} – отклонение профиля в нулевой измерительной фазе от границы минимального припуска во второй наладке, мм; δ_{45_1} – отклонение профиля в нулевой измерительной фазе от границы минимального припуска в первой наладке, мм.

Для остальных угловых фаз разности находятся аналогично.

В качестве примера приведем результаты исследований влияния закрытой высоты штампа штамповочного пресса (рис. 5, а) на распределение припуска. Исследование этого наладочного смещения важно, поскольку в процессе штамповки ведется его изменение для обеспечения компенсации температурных расширений в системе штамп-пресс. В табл. 1 приведены рассчитанные для каждой измерительной фазы разности значений припуска. На рис. 6 приведены графики изменения величины припуска по угловым фазам шатунных шеек коленчатого вала от изменения уменьшения закрытой высоты штампа на 1 мм и вид аппроксимирующей их степенной функции.

Как видим, графики изменения припуска по шатунным шейкам, выполненные в различных наладках совпадают. Для четвертой шатунной шейки профили совпадают не в полной мере, это объясняется тем, что в первой наладке штамп был не полностью прогрет, вследствие этого деформация металла по четвертой коренной шейке прошла не так, как в прогретом штампе. Для вывода математических моделей использовались данные со второй наладки, выполненные на полностью прогретом штампе. В табл. 2 приведены математические модели, связывающие наладочные смещения штамповочного оборудования и штамповочные смещения. Найденные математические модели используются для ручного подбора значений наладочных смещений штамповочного оборудования. Математические модели необходимо постоянно обновлять в зависимости от значимых изменений штамповой оснастки, например при изменении форм гравюр штамповых вставок или после текущего ремонта оборудования автоматической линии.

На рис. 7 приведены круговые диаграммы распределения припуска после подбора значений наладочных смещений штамповочного оборудования. Для устранения нехватки припуска по начальным данным круговых диаграмм потребовалось уменьшить закрытую высоту штампа на величину 0,6 и выполнить высвобождение гравюр калибровочного штампа соседним со второй шатунной шейкой противовесом на величину 1 мм.

Таблица 1. Разности отклонений профиля от границы минимального припуска в исследуемых наладках для шатунных шеек поковок коленчатого вала

Table 1. Difference in profile deviations from the minimum allowance limit in the studied settings for connecting rod journals of crankshaft forgings

Шейка коленвала	Угловые фазы, град	Наладка 1-2	Наладка 3-4	Шейка коленвала	Наладка 1-2	Наладка 3-4
		δ , мм	δ , мм		δ , мм	δ , мм
ШШ 1	0	0,00	-1,50	ШШ 3	0,50	0,30
	45	1,00	1,70		-1,00	-1,00
	90	1,00	1,30		-0,80	-1,40
	135	1,30	1,60		-0,80	-0,60
	180	1,20	0,70		-0,50	-0,60
	225	-0,20	-0,50		0,50	0,80
	270	-0,90	-0,90		0,20	0,40
	315	-1,00	-2,60		0,50	1,30
ШШ 2	0	0,30	1,00	ШШ 4	1,20	1,20
	45	0,40	0,70		1,00	1,20
	90	1,80	2,30		0,10	1,60
	135	1,80	3,20		0,30	1,50
	160	1,50	1,60		0,00	1,00
	180	1,00	0,00		-0,50	-0,50
	225	-0,60	-2,30		-0,50	-1,80
	270	-1,70	-2,30		-0,30	-2,00
	315	-2,30	-1,80		0,00	-0,30
	340	-1,00	-0,70		1,00	1,00

Таблица 2. Степенные полиномы, аппроксимирующие графики изменения геометрических размеров поковок коленчатых валов при уменьшении закрытой высоты штампа на величину 1 мм

Table 2. Power polynomials, approximating graphs of changes in the geometric dimensions of crankshaft forgings with a decrease in the shut height of the die by 1 mm

Шейка коленчатого вала	Степенной полином	Надежность аппроксимации
1 КШ	$y = -0,0043x^4 + 0,1559x^3 - 1,5823x^2 + 5,3194x - 4,1002$	$R^2 = 0,9272$
2 КШ	$y = 0,0677x^3 - 0,9374x^2 + 3,4258x - 2,4$	$R^2 = 0,9445$
3 КШ	$y = 0,0626x^3 - 0,8847x^2 + 3,2336x - 1,6857$	$R^2 = 0,8893$
4 КШ	$y = -0,0167x^5 + 0,3859x^4 - 3,2795x^3 + 12,41x^2 - 19,8x + 10,125$	$R^2 = 0,9397$
5 КШ	$y = -0,0051x^4 + 0,0922x^3 - 0,5804x^2 + 1,5485x - 0,8831$	$R^2 = 0,9025$
1 ШШ	$y = 0,0026x^5 - 0,0774x^4 + 0,8852x^3 - 4,8809x^2 + 12,421x - 9,8$	$R^2 = 0,9652$
2 ШШ	$y = -0,0064x^5 + 0,1848x^4 - 1,9047x^3 + 8,3066x^2 - 14,403x + 8,8067$	$R^2 = 0,9894$
3 ШШ	$y = 0,004x^4 - 0,1138x^3 + 1,1092x^2 - 3,8867x + 3,175$	$R^2 = 0,9279$
4 ШШ	$y = -0,0143x^4 + 0,3324x^3 - 2,3652x^2 + 5,3333x - 1,7911$	$R^2 = 0,9638$

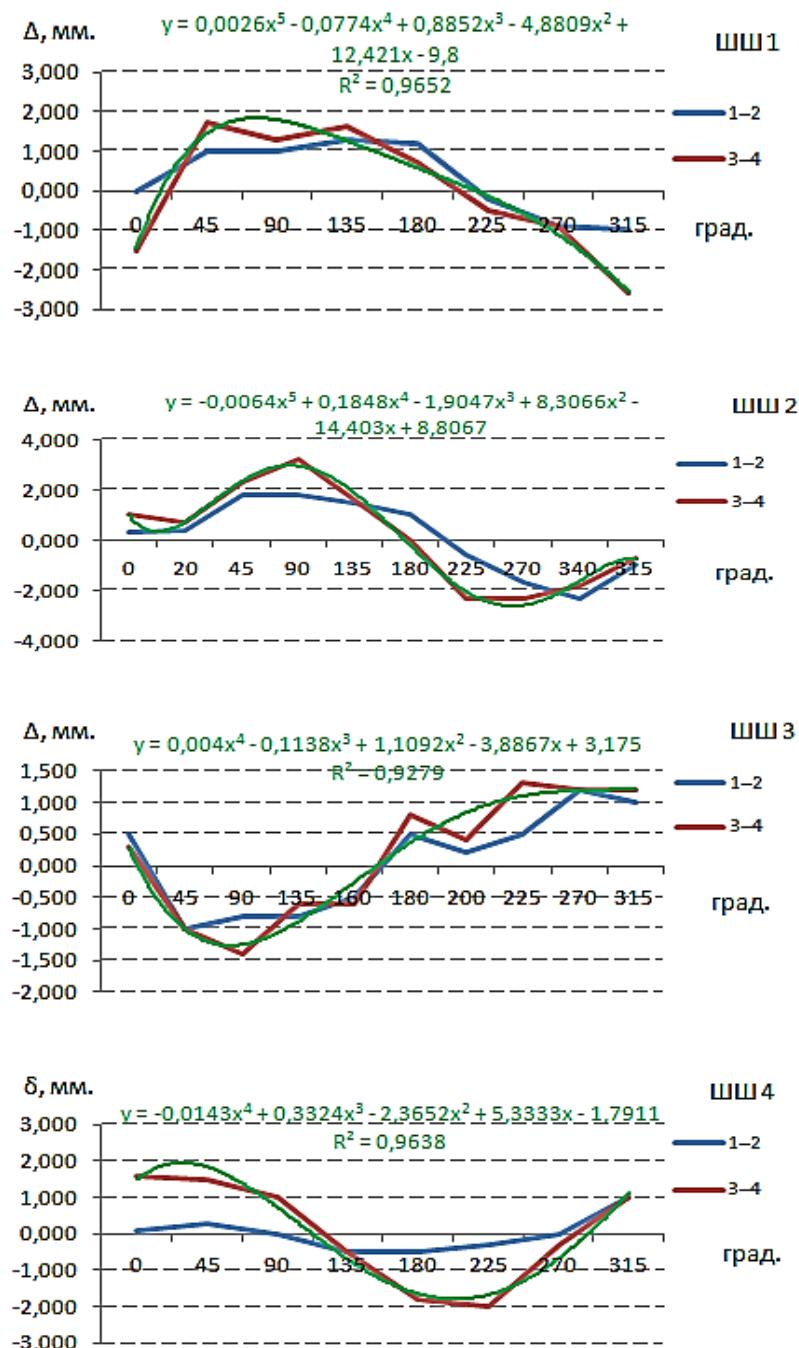


Рис. 6. Графики изменения отклонений профиля шатунных шеек от границы минимального припуска по угловым фазам: 1-2 – непрогретый штамп, уменьшение закрытой высоты штампа на 1 мм; 3-4 – прогретый штамп, уменьшение закрытой высоты штампа на 1 мм

Fig. 6. Graphs of changes in deviations of the profile of the connecting rod journals from the minimum allowance threshold for angular phases: 1-2 is an unheated die, reduction of the shut height of the die by 1 mm; 3-4 is a heated die, reduction of the shut height of the die by 1 mm

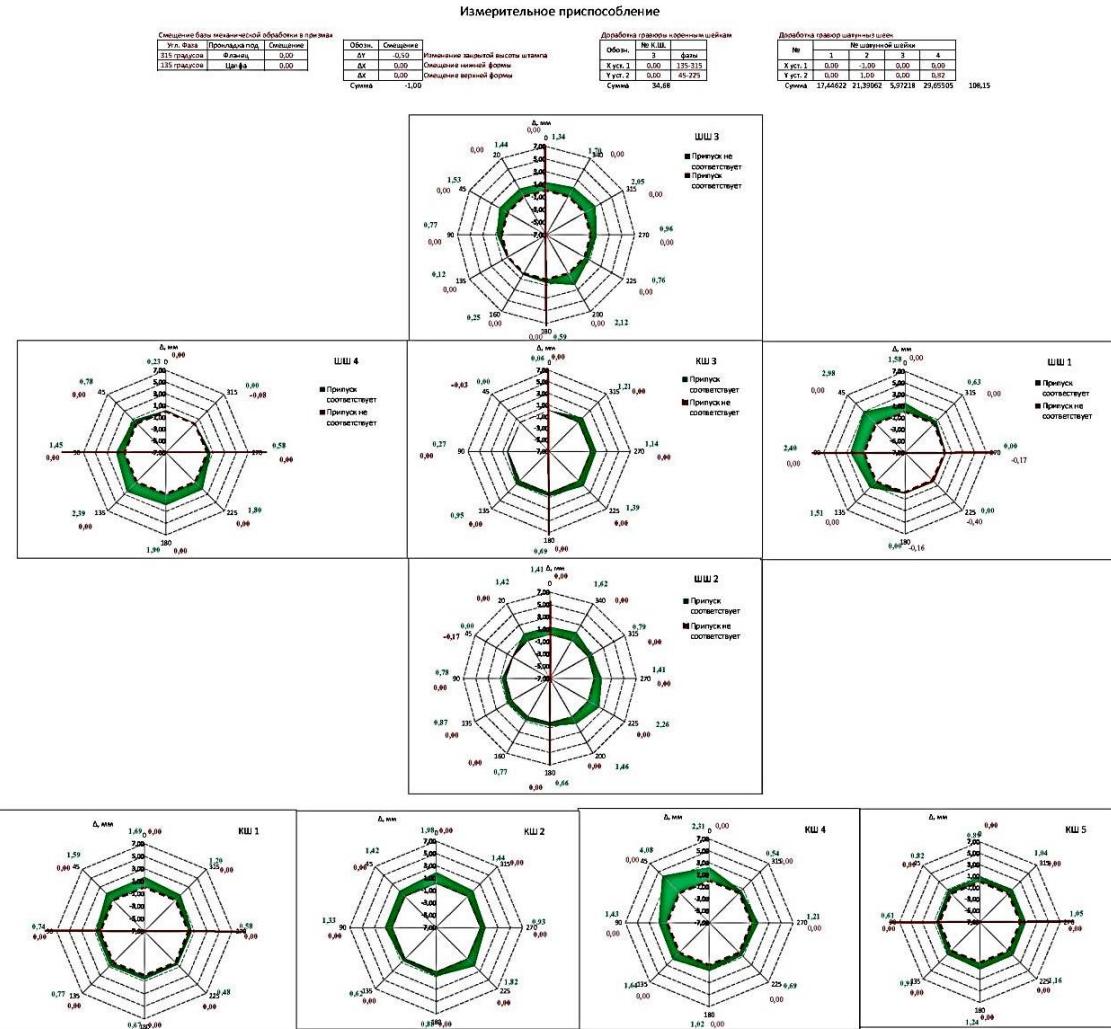


Рис. 7. Диаграммы распределения припуска по коренным и шатунным шейкам поковки коленчатого вала после подбора значений наладочных смещений

Fig. 7. Diagrams of the allowance distribution along the main and connecting rod journals of the crankshaft forging after selecting the values of the adjustment offsets

Заключение

Разработанная схема анализа наладочных смещений позволяет достаточно точно определить величину распределения припуска по коренным и шатунным шейкам поковки коленчатого вала в процессе подналадок главного ковочного пресса и другого штамповочного оборудования автоматической линии. Повышается точность наладочных смещений и, соответственно, качество изготовления и геометрическая точность поковок коленчатых валов.

Список литературы

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., по-

свящённой 60-летию ЛГТУ. Липецк, 2016. С. 330–335.

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. Мартюгин А.В. Математическое исследование геометрической точности поковки при штамповке для обеспечения последующей балансировки коленчатого вала // Наука. Технологии. Инновации: сб. науч. тр. В 9-ти ч. / под ред. А.В. Гадюкиной. Новосибирск: Изд-во НГТУ, 2018. С. 52–56.
4. Мартюгин А.В. Технологическое обеспечение балансировки поковок коленчатых валов большегрузного автомобиля // Известия ТулГУ. Технические науки. 2014. Вып. 11. Ч. 1. С. 176–183.
5. Мартюгин А.В. Устранение дисбаланса коленчатых валов Р4 вне технологических линий производства // Будущее науки-2016: сб. науч. ст. 4-й Междунар.

- молодеж. науч. конф.: в 4-х т. / отв. ред. А.А. Горюхов. Курск, 2016. С. 90–94.
6. Мартюгин А.В., Володин И.М. Анализ результатов исследования дисбаланса поковок коленчатых валов с использованием нейросети // Colloquium-journal. №26 (50). 2019. С. 89–94.
 7. Особенности проектирования технологических процессов горячей объемной штамповки коленчатых валов с оригинальными требованиями к качеству поковок / Мартюгин А.В., Володин И.М., Володин А.И., Биктимирова Г.Ф. // Современные научноемкие технологии. 2019. № 4. С. 41–49.
 8. Совершенствование метода проектирования технологических процессов горячей объемной штамповки коленчатых валов с необрабатываемыми противовесами / Мартюгин А.В., Володин И.М., Володин А.И., Биктимирова Г.Ф. // Известия ТулГУ. Технические науки. 2020. Вып. 6. С. 364–371.
 9. Кужагильдин 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.
 10. Матыкова Е.А. Моделирование технологического процесса штамповки поковки «Коленчатый вал» в программном комплексе QForm 3D // Наука и образование. 2008. № 7. С. 5.
 11. Мишечкин А.А., Шумило Е.А., Босикашвили И.Г. Разработка и совершенствование процесса горячего формообразования поковки «Шестерня» моделированием в программе QForm // Инновационные технологии в электронике и приборостроении: сб. докл. Российской науч.-техн. конф. с междунар. участием. Москва, 2021. С. 155–159.
 12. Фомичев А.Ф., Панин С.Ю. Компьютерное исследование методов повышения качества поковок // Металлообработка. 2013. № 5–6 (77–78). С. 56–58.
 13. Хайруллин Р.А., Мартемьянова О.Н. Повышение стойкости ковочных штампов для изготовления поковок коленчатого вала // Современная наука: теоретический и практический взгляд: материалы I Междунар. науч.-практ. конф. Таганрог: ООО «НОУ «Вектор науки», 2014. С. 86–89.

References

1. Volodin I.M., Chekh A.V., Volodin A.I. The study on the shape change of a forging, when removing the flash. *Problemy i perspektivy razvitiya mashinostroeniya: sb. nauch. tr. mezhdunar. nauch.-tekhn. konf., posvyashchennoy 60-letiyu LGTU* [Problems and prospects of the development of mechanical engineering. Collection of scientific papers of the international scientific and technical conference dedicated to the 60th anniversary of LSTU]. Lipetsk, 2016, pp. 330–335. (In Russ.)
2. Martyugin A.V., Volodin I.M. Reducing the effect of deformation during flash trimming on geometric accuracy and imbalance of crankshaft forgings. Colloquium-journal, 2019, no. 26-2 (50), pp. 91–94. (In Russ.)
3. Martyugin A.V. Mathematical study on geometric accuracy of a forging during stamping to ensure subsequent balancing of the crankshaft. *Nauka. Tekhnologii. Innovatsii: sb. nauch. tr. v 9-ti ch.* [Science. Technologies. Innovations. Collection of scientific papers in 9 parts]. Edited by A.V. Gadyukina. Novosibirsk: NSTU, 2018, pp. 52–56. (In Russ.)
4. Martyugin A.V. Technological support for balancing crankshaft forgings for heavy trucks. *Izvestiya TulGU. Tekhnicheskie nauki* [Proceedings of TulSU. Engineering Sciences], 2014, no. 11, part 1, pp. 176–183. (In Russ.)
5. Martyugin A.V. Eliminating imbalance of crankshafts P4 outside the production lines. *Budushchee nauki-2016: sb. nauch. st. 4-oy Mezhdunar. molodezh. nauch. konf.: v 4-kh t.* [Future of Science-2016. Collection of scientific papers of the 4th International Youth Scientific Conference: in 4 volumes]. Edited by A.A. Gorokhov. Kursk, 2016, pp. 90–94. (In Russ.)
6. Martyugin A.V., Volodin I.M. Analysis of the results of the study on imbalance of crankshaft forgings, using a neural network. Colloquium-journal, 2019, no. 26 (50), pp. 89–94. (In Russ.)
7. Martyugin A.V., Volodin I.M., Volodin A.I., Biktumirova G.F. Design features of hot forging processes with original requirements for the quality of forgings. *Sovremennye naukoemkie tekhnologii* [Modern High Technologies], 2019, no. 4, pp. 41–49. (In Russ.)
8. Martyugin A.V., Volodin I.M., Volodin A.I., Biktumirova G.F. Improving the method of designing hot forging processes for crankshafts with unprocessed counterweights. *Izvestiya TulGU. Tekhnicheskie nauki* [Proceedings of TulSU. Engineering Sciences], 2020, no. 6, pp. 364–371. (In Russ.)
9. Kuzhagildin R.S., Shutova L.A. Increasing resistance of dies for hot deformation. *Sotsialno-ekonomicheskie i tekhnicheskie sistemy: issledovanie, proektirovanie, optimizatsiya* [Social, Economic and Technical Systems: Research, Design, Optimization], 2019, no. 1 (80), pp. 50–58. (In Russ.)
10. Matyкова Е.А. Modeling a stamping process of crankshaft forging in QForm 3D software. *Nauka i obrazovanie* [Science and Education], 2008, no. 7, p. 5. (In Russ.)
11. Myshchkin A.A., Shumilo E.A., Bosikashvili I.G. Development and improvement of the hot forming process of the gear forging by modeling in QForm software. *Innovatsionnye tekhnologii v elektronike i priborostroenii: sb. dokl. Rossийской науч.-tekhn. konf. s mezhdunar. uchastiem* [Innovative technologies in electronics and instrumentation. Collection of reports of the Russian Scientific and Technical Conference with an International Participation]. Moscow, 2021, pp. 155–159. (In Russ.)
12. Fomichev A.F., Panin S.Yu. Computer research of methods for improving the quality of forgings. *Metalloobrabotka* [Metalworking], 2013, no. 5-6 (77-78), pp. 56–58. (In Russ.)

13. Khairullin R.A., Martemyanova O.N. Increasing durability of forging dies to manufacture crankshaft bearings. *Sovremennaya nauka: teoreticheskiy i prakticheskiy vzglyad: materialy I Mezhdunar. nauch.-prakt. konf.* [Modern Science: Theoretical and Practi-

cal Outlook: Proceedings of the 1st International Scientific and Practical Conference]. Taganrog: LLC Non-State Educational Institution Vector of Science, 2014, pp. 86–89. (In Russ.)

Поступила 28.12.2021; принята к публикации 28.01.2022; опубликована 25.03.2022
Submitted 28/12/2021; revised 28/01/2022; published 25/03/2022

Сафаров Дамир Тамасович – кандидат технических наук, доцент,
Набережночелнинский институт (филиал) Казанского (Приволжского) федерального университета,
Набережные Челны, Россия.

Email: safarov-dt@mail.ru. ORCID 0000-0002-8297-4524

Чех Александр Васильевич – директор,
Кузнецкий завод ПАО «Камский автомобильный завод», Набережные Челны, Россия.
Email: ChehAV@kamaz.ru

Damir T. Safarov – PhD (Eng.), Associate Professor,
Naberezhnye Chelny Institute (branch) of Kazan (Volga Region) Federal University, Naberezhnye Chelny, Russia.
Email: safarov-dt@mail.ru. ORCID 0000-0002-8297-4524

Alexander V. Chekh – Director,
Forging Plant of PJSC Kama Automobile Plant, Naberezhnye Chelny, Russia.
Email: ChehAV@kamaz.ru