



Федеральное государственное бюджетное научное учреждение  
«Федеральный научный агроинженерный центр ВИМ»  
(ФГБНУ ФНАЦ ВИМ)

# ТЕХНИЧЕСКИЙ СЕРВИС МАШИН

№4 (137) 2019

## ДЕФОРМАЦИИ КОЛЕНЧАТЫХ ВАЛОВ ПРИ ИХ ВОССТАНОВЛЕНИИ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ НАПЛАВКИ

*Владимир Петрович Иванов, доктор технических наук, профессор;  
Татьяна Владимировна Вигерина, кандидат технических наук, доцент  
Полоцкий государственный университет,  
г. Новополоцк, Республика Беларусь*

**Реферат.** *Объяснение уменьшения длины коленчатых валов автомобильных двигателей в результате их наплавки и обоснование мер, уменьшающих эту деформацию, представляет собой актуальную задачу. (Цель исследования) Выявить причины, обуславливающие укорачивание коленчатых валов при наплавке с их количественной оценкой, и обосновать меры, уменьшающие объем этого явления. (Материалы и методы) Исследовали стальные коленчатые валы двигателей. Наносили на шейки валов восстановительное покрытие дуговой наплавкой из проволок 1,6Св-08Х13 или У7 в среде защитного газа [Ar+(20-30 процентов CO<sub>2</sub>)]. Измерили длину детали до и после восстановления. Изучили распределение температуры материала, как по поверхности детали, так и в ее глубине методом конечных элементов с использованием T-FLEX-анализа. (Результаты и обсуждение) Выявили, что длина коленчатых валов после нескольких наплавки уменьшается до 3 миллиметра. Установили зависимость линейной деформации вала. Определили, что напряжения сжатия в материале детали в 2,8 раза меньше напряжений растяжения в материале покрытия. Отметили, что значение растягивающих напряжений в материале покрытия близко к пределу его прочности, поэтому в покрытии образуются микротрещины, снижающие усталостную прочность детали. (Выводы) Описали механизм осевого деформирования наплавленного коленчатого вала, устанавливающий влияние модуля упругости, температуру нагрева и коэффициента линейного расширения материалов восстанавливаемого изделия и покрытия и размеры наносимого валика материала на напряжения в покрытии и основном материале. Наибольшее влияние на деформацию, а, следовательно, на указанные напряжения оказывает температура нагрева материала покрытия и коэффициент линейного расширения материалов покрытия и заготовки. Число наплавки шеек валов необходимо сократить до двух в течение всего срока их службы.*

**Ключевые слова:** *коленчатый вал, восстановление, наплавка, деформирование, метод конечных элементов, T-FLEX-анализ.*

**Для цитирования:** *Иванов В.П., Вигерина Т.В. Деформации коленчатых валов при их восстановлении с использованием наплавки // Технический сервис машин. 2019. N4(137). С. 127-135.*

## DEFORMATIONS OF CRANKSHAFTS AT THEIR RECOVERY USING SURFACING

*Vladimir P. Ivanov, Dr.Sc.(Eng.), professor;  
Tat'yana V. Vigerina, Ph.D(Eng.), associate professor  
Polotsk state University, Novopolotsk, Republic of Belarus*

**Abstract.** *The explanation of the reduction in the length of crankshafts of automobile engines because of their surfacing and the justification of measures of reducing this deformation is an urgent task. (Research purpose) The research purpose is identification of the reasons for shortening the crankshafts during surfacing with their quantitative assessment and justification of measures for elimination this phenomenon. (Materials and methods). The authors have studied steel engine crankshafts. A reducing coating was applied to the shaft necks by arc surfacing of 1.6 SV-08Kh13 or U7 wire in a protective gas medium [Ar + (20-30prozentos CO<sub>2</sub>)]. The length of the part was measured before and after recovery. The temperature distribution into the material, both over the surface and in its depth, was studied by the finite element method using T-FLEX analysis. (Results and discussion). The length of the crankshafts after several surfacing is reduced to 3 mm. The dependence of linear shaft deformation is identified. Compression stresses in the material of the part are 2.8 times less than tensile stresses in the coating material. The value of tensile stresses in the coating material is close to its tensile strength; therefore, microcracks are formed in the coating, which reduce the fatigue strength of the part. (Conclusion). The article describes the mechanism of axial deformation of the surfaced crankshaft, describes the effect of the elastic modulus, heating temperature and linear expansion coefficient of materials of the restored part and coating and the dimensions of the surfaced material roller on stresses in the coating and the main material. The greatest influence on the deformation, and on the described stresses is exerted by the heating temperature of the coating material and the coefficient of linear expansion of the coating materials and the workpiece. The number of surfacing of the necks of the shafts must be reduced to two during the entire period of their service.*

**Keywords:** *crankshaft, restoration, surfacing, deformation, finite element method, T-FLEX analysis.*

**For citation:** *Ivanov V.P., Vigerina T.V. Deformatsii kolenchatykh valov pri ikh vosstanovlenii s ispol'zovaniyem naplavki [Deformations of crankshafts at their recovery using surfacing]. Tekhnicheskii servis mashin. 2019. N4(137). 127-135. (In Russian).*

**Введение.** Априори следует ожидать, что длина восстановленных деталей, которые подвергались нанесению покрытий с помощью источников тепла, или не изменяется, или увеличивается. Однако практика восстановления коленчатых валов показывает, что от восстановления к восстановлению длина наплавленной детали уменьшается [1, 2]. При этом бывали случаи, когда восстановленный коленчатый вал касался щеками коренных опор корпусной детали или его вообще невозможно было установить в блок цилиндров при сборке двигателя. Зачастую при наплавке коленчатых валов к ним прикладывают растягивающую силу от пневмоцилиндра, которая умень-

шает изменение длины детали. Таким образом, выявление механизма деформирования коленчатых валов в результате их наплавки и обоснование мер, уменьшающих это деформирование, являются актуальной задачей.

**Цель исследования** – выявить причины, обуславливающие укорачивание коленчатых валов при наплавке с их количественной оценкой, и обосновать меры, уменьшающие объем этого явления.

**Материалы и методы.** В качестве образцов использовали коленчатые валы автомобильных рядных двигателей, изготовленных из углеродистой конструкционной стали 45. На шейки валов наносили восстановительное покрытие дуговой наплавкой из проволок 1,6Св-08Х13 или У7 (последнюю в исследовательских целях) в среде защитного газа [Ar + (20-30% CO<sub>2</sub>)]. Покрытия наносили на заводском наплавочном станке, созданном на базе списанного токарного станка модели 16К20. Передняя и задняя бабки станка подняты над станиной на втулках и закреплены болтами так, чтобы вращающийся коленчатый вал не касался суппорта. Частота вращения вала при наплавке составляла 1,5-2,0 мин<sup>-1</sup>, для обеспечения которой в привод главного движения введен дополнительный редуктор. Механизм для подачи проволоки установлен на суппорте станка и изолирован вместе с проволочной кассетой от остальной части установки. Напряжение подавали к медному вращающемуся кольцу на шпинделе установки и мундштуку, через который выходила электродная проволока.

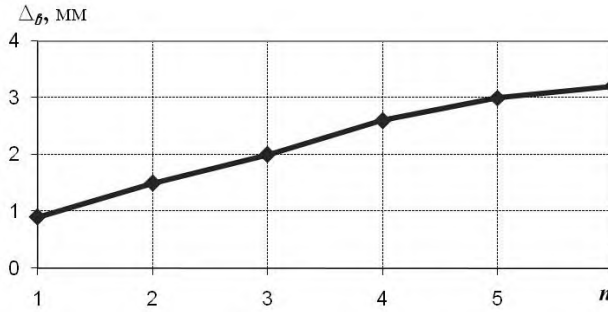
Защитные газы поступали из двух баллонов в смеситель, необходимое процентное соотношение их устанавливали регулированием давления на входе в смеситель.

Режим нанесения покрытий следующий: сила тока 205 А, напряжение 30В; расход смеси защитных газов 30 л/мин; вылет наплавляемой проволоки 13-17 мм; скорость ее подачи 194 м/ч; полярность тока – обратная. В качестве источника питания использовали выпрямитель ВС-300 с жесткой вольтамперной характеристикой. Толщина наплавленного слоя за один ход составляла 2,0-2,2 мм. После нанесения покрытия шейки валов проходили обработку резанием: точением, шлифованием и полированием. Длину детали до и после восстановления измеряли с помощью штангенциркуля ШЦ-630 с ценой деления 0,1 мм.

Распределение температуры материала как по поверхности детали, так и в ее глубине изучали на компьютере методом конечных элементов. Математическое моделирование осуществлялось с использованием T-FLEX-анализа. При этом между трехмерной моделью изделия и расчетной конечно-элементной моделью поддерживалась ассоциативная связь. Параметрические изменения исходной твердотельной модели автоматически переносились на сеточную конечно-элементную модель.

**Результаты и обсуждение.** При необезличенном ремонте двигателей их коленчатые валы до шести раз подвергаются нанесению покрытий, что установлено по контрольным меткам, оставляемым наплавщиками на щеках валов при каждом нанесении покрытия. Наплавка и напыление покрытий с использованием источников тепла уменьшают длину восстанавливаемого вала из-за одновременного и неравномерного нагрева и охлаждения участков детали и покрытия. Это особенно заметно для наплавленных валов, по сравнению с напыленными валами, потому что для первых характерен нагрев до большей температуры с расплавлением поверхностных слоев металла восстанавливаемых шеек. Среднее уменьшение длины, установленное по

данным измерений групп валов из 15-20 ед., показано на *рисунке 1*. В каждую группу входили валы с одинаковым числом наплавов шеек.



*Рис. 1. Среднее уменьшение длины коленчатых валов Δ<sub>с</sub> от числа наплавов n*

Длина коленчатых валов после нескольких наплавов уменьшается до 3 мм за счет наложения друг на друга дополнительных внутренних напряжений в материале покрытия и детали. Из рисунка следует, что ограничение числа наплавов до двух в течение срока службы детали позволит избежать ее значительных деформаций.

При наплавке заготовки на поверхности ее шейки образуется валик материала с высокой температурой. При охлаждении покрытия в нем возникают растягивающие напряжения в направлении, противоположном усадке. Эти напряжения уравниваются сжимающими напряжениями в материале заготовки, находящемся под покрытием.

Оценивая температурное поведение изделия под действием источников тепла, использовали тепловой анализ для оценки возникающих в изделии температурных деформаций. При постановке задачи в T-FLEX-анализе задавали нестационарный процесс – расчет температурных полей осуществляли в функции времени. Вводили геометрические параметры моделируемой системы и строили конечно-элементную сетку, аппроксимирующую геометрию конструкции.

При наплавке теплота вводится в изделие через катодное пятно нагрева электрической дуги. Такой источник теплоты считается поверхностным, эффективная тепловая мощность которого в нашем случае составляла 5,53 кВт, он перемещался равномерно со скоростью 0,004 м/с относительно поверхности восстанавливаемой детали.

В неподвижной системе координат температурное поле точечного подвижного непрерывно действующего источника постоянной мощности, контактирующего с поверхностью детали с постоянной скоростью, определяется по формуле [3, 4]:

$$T(x_0, y_0, z_0, t) = T_n + \int_0^t \frac{2q}{c\rho\sqrt{[4\pi a(t-t')]^3}} \cdot \exp\left(-\frac{(x_0 - vt')^2 + y_0^2 + z_0^2}{4a(t-t')}\right) dt', \quad (1)$$

где  $T(x_0, y_0, z_0, t)$  – температура материала на его поверхности в точке с координатами  $x_0, y_0, z_0, K$ ;  $t$  – время перемещения источника теплоты, с;  $T_n$  – начальная температура материала,  $K$ ;  $t'$  – время распространения теплоты, с;  $v$  – скорость наплавки, м/с;  $q$  – эффективная тепловая мощность электрической дуги, Вт;  $c$  – удельная теплоемкость, Дж/кг·К;  $\rho$  – плотность матери-

ала,  $\text{кг/м}^3$ ;  $a = \lambda / c\rho$  – коэффициент температуропроводности материала,  $\text{м}^2/\text{с}$ ;  $\lambda$  – теплопроводность материала,  $\text{Вт}/(\text{м}\cdot\text{К})$ .

Время перемещения источника теплоты соответствовало времени наплавки одного валика  $t = 40 \text{ с}$ .

Программа разбивает анализируемую конструкцию на множество конечных элементов и для каждого из них производит расчет температуры в соответствии с уравнением (1). В результате проведенных расчетов получили графическое изображение температуры материала на его поверхности при наплавке (рис. 2). Температура материала валика наплавки, как следует из рисунка, достигает  $1400\text{-}1500 \text{ }^\circ\text{C}$ .

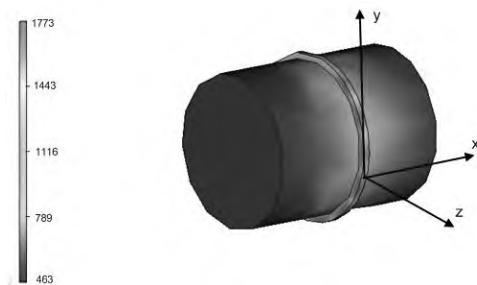


Рис. 2. Распределение температурного поля в материале заготовки при наплавке

Для расчета деформаций в материале восстанавливаемой детали и валике наплавленного металла и внутренних напряжений были приняты следующие допущения:

- наплавляемый валик металла представляет собой тороидальное кольцо, имеющее металлическую связь с материалом заготовки;
- сечение валика представляет собой эллипс с осями  $a$  и  $b$  (м);
- напряжения в поперечных сечениях наплавленного валика и основы деталей распределены равномерно;
- температура нагрева материала валика значительно выше температуры нагрева материала заготовки;
- расплавленный металл валика после нанесения кристаллизуется и охлаждается до комнатной температуры;
- взаимодействие валика с основным металлом наступило после его нанесения;
- коэффициент Пуассона  $\mu$  в расчетах не учитывался.

За счет охлаждения металла валика его размеры, в том числе ширина  $b$  будут уменьшаться, чему препятствует участок детали диаметром  $(d - a)$  и длиной  $b$  под валиком (рис. 3).

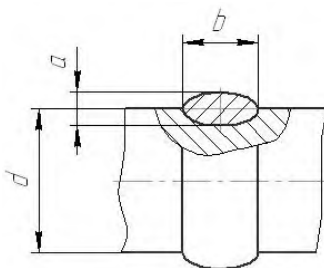


Рис. 3. Схема шейки детали с наплавленным валиком материала

Материал валика в направлении оси детали будет растянут под действием силы  $P_{pc}$ , а материал шейки детали под валиком сжат под действием силы  $P_{сж}$  (рис. 4).

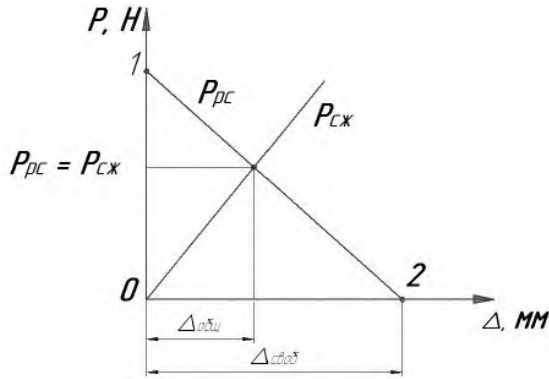


Рис. 4. Графики сил  $P$  в зависимости от деформации  $\Delta$ : растягивающей покрытие  $P_{pc}$ ; сжимающей материал детали  $P_{сж}$

Деформация материала валика  $\Delta_{своб}$  вдоль оси детали при охлаждении в отсутствии сопротивления со стороны материала детали равна:

$$\Delta_{своб} = b(t_n - t_k)\alpha, \text{ м}, \quad (2)$$

где  $t_n$  и  $t_k$  – температура нагрева материала покрытия и температура воздуха в цехе, соответственно,  $K$ ;  $\alpha$  – температурный коэффициент линейного расширения,  $1/K$ .

При сопротивлении со стороны детали, когда длина сечения валика останется без изменения, напряжения растяжения  $\sigma_{pc}$  в материале валика достигнут значения [5, 6]:

$$\sigma_{pc} = \frac{\Delta_{своб}}{b} E_{II}, \text{ МПа}, \quad (3)$$

где  $E_{II}$  – модуль упругости первого рода для материала покрытия, МПа.

Сила  $P_{pc}$ , растягивающая материал покрытия при деформации  $\Delta_{своб}$ , равна:

$$P_{pc} = \sigma_{pc} \left[ \frac{\pi(d+a)^2}{4} - \frac{\pi(d-a)^2}{4} \right] = \sigma_{pc} \pi da, \text{ кН}. \quad (4)$$

Зависимость силы  $P_{pc}$  от деформации  $\Delta$  в виде уравнения прямой, проходящей через две точки 1 и 2 (рис. 4), находили из условия:

координаты точки 1:  $[0; (t_n - t_k)\alpha E_{II} \pi da]$ ,

координаты точки 2:  $[\Delta_{своб}; 0]$ ,

тогда уравнение прямой примет вид:

$$\frac{\Delta - 0}{\Delta_{своб} - 0} = \frac{P_{pc} - (t_n - t_k)\alpha E_{II} \pi da}{0 - (t_n - t_k)\alpha E_{II} \pi da}, \quad (5)$$

откуда:

$$P_{pc} = \frac{(t_n - t_k)\alpha E_{II} \pi da - \Delta E_{II} \pi da}{b} = \frac{E_{II} \pi da}{b} [(t_n - t_k)b\alpha - \Delta], \text{ кН}. \quad (6)$$

Сила  $P_{сж}$ , сжимающая материал детали, зависит от деформации  $\Delta$  следующим образом:

$$P_{сж} = \frac{\Delta}{b} E_d \frac{\pi(d-a)^2}{4}, \text{ кН}, \quad (7)$$

где  $E_d$  – модуль упругости первого рода для материала детали, МПа.

Равновесие фрагмента детали имеет место при:

$$P_{рс} = P_{сж} \text{ и } \Delta = \Delta_{общ}, \quad (8)$$

откуда:

$$\frac{E_n \pi da}{b} [(t_n - t_k) b \alpha - \Delta_{общ}] = \frac{\Delta_{общ}}{b} E_d \frac{\pi(d-a)^2}{4}. \quad (9)$$

Решая уравнение относительно  $\Delta_{общ}$ , получаем значение деформации шейки вала в пределах ширины наплавленного валика металла:

$$\Delta_{общ} = \frac{E_n da (t_n - t_k) b \alpha}{E_n da + \frac{E_d (d-a)^2}{4}}, \text{ м} \quad (10)$$

Деформация шейки вала в пределах длины валика при наплавке проволоки Св-08Х13  $\Delta = 0,01151$  мм меньше, чем при наплавке проволоки У7  $\Delta = 0,01365$  мм. Как показывает полученная зависимость, определяющее влияние на деформацию, а, следовательно, на остаточные напряжения оказывает температура нагрева материала покрытия и температурный коэффициент линейного расширения. Меньшее влияние оказывает соотношение значений модуля упругости первого рода материалов покрытия и заготовки. Поэтому при выборе наплавочного материала следует отдавать предпочтение материалу с более низким значением температурного коэффициента линейного расширения, а нанесение покрытий вести с минимально возможной температурой. Расчеты показывают, что при наплавке десяти шеек вала уменьшение его длины составляет 0,6-0,8 мм, что соответствует данным инструментальных измерений.

Значение модуля упругости первого рода материала наплавленного металла значительно меньше соответствующего показателя для исходного металла по причине наличия пор и несплошностей в покрытии. Имея деформации элементов детали и покрытия, их размеры и модули упругости, растягивающие напряжения в покрытии вдоль оси детали составляют значение:

$$\sigma_{рс} = \frac{\Delta}{b} E_n = \frac{0,01151}{8} \cdot 1,5 \cdot 10^5 = 215,8, \text{ МПа},$$

что соответствует силе, растягивающей покрытие в 0,141 МН, которую уравновешивает сила сжатия материала детали, обусловленная напряжениями сжатия:

$$\sigma_{сж} = \sigma_{рс} \frac{4da}{(d-a)^2} = 215,8 \frac{4 \cdot 0,052 \cdot 0,004}{(0,052 - 0,004)^2} = 77,9, \text{ МПа}.$$

Напряжения сжатия в материале детали в 2,8 раза меньше напряжений растяжения в материале покрытия. Значения растягивающих напряжений в материале покрытия близки к пределу его прочности, поэтому при неблагоприятном течении процесса в покрытии образуются микротрещины, снижающие усталостную прочность детали [7-10]. Уменьшение толщины покрытия существенно снижает вероятность появления таких трещин.

**Выводы.** Описан механизм осевого деформирования наплавленного ко-



ленчатого вала, учитывающий тепловые процессы, происходящие при наплавке, и устанавливающий влияние модуля упругости, температуры нагрева и термического коэффициента линейного расширения материалов восстанавливаемого изделия и покрытия, размеры наносимого валика материала на напряжения в покрытии и основном материале. Наибольшее влияние на деформацию, а, следовательно, на указанные напряжения оказывает температура нагрева материала покрытия и температурный коэффициент линейного расширения материалов покрытия и заготовки. Меньшее влияние оказывает соотношение значений модуля упругости первого рода материалов покрытия и заготовки. Предложенные зависимости позволяют определить уменьшение длины вала при наплавке. Число наплавков шеек валов полезно сократить до двух в течение всего срока их службы.

### Библиографический список

1. Иванов В.П., Вигерина Т.В. Восстановление коленчатых валов автомобильных двигателей. *Palmarium Academic Publishing*. 2019. 210 с.
2. Денисов А.С., Погораздов В.В., Тугушев Б.Ф., Горшенина Е.Ю. Технологическое обеспечение качества восстановленных коленчатых валов дизельных двигателей // *Вестник Саратовского государственного технического университета*. 2010. Т. 4. №1(49). С. 49-55.
3. Коновалов А.В., Неровный В.М., Куркин А.С. Теория сварочных процессов. М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана. 2007. 752 с.
4. Степин П.А. Сопротивление материалов. СПб.: Лань. 2012. 320 с.
5. Волков И.А., Коротких Ю.Г., Тарасов И.С., Шишулин Д.Н. Численное моделирование упругопластического деформирования и накопления повреждений в металлах при малоцикловой усталости // *Проблемы прочности*. 2011. №4. С. 147-165.
6. Махалов М.С., Блюментейн В.Ю. Механика процесса ППД. Остаточные напряжения в упрочняемом упругопластическом теле // *Обработка металлов (технология, оборудование, инструменты)*. 2019. Т. 21. №2. С. 110-123.
7. Андрущенко М.И. Разработка технологии восстановления и упрочнения коленчатого вала коленорычажных прессов. Часть 1. Анализ условий труда, характеристика // *Проблемы трибологии*. 2017. №4. С. 33-38.
8. Yanagisawa Y., Kishi Y., Sasakib K. Analysis of Residual Stresses during Heat Treatment of Large Forged Shafts Considering Transformation Plasticity and Creep Deformation // *Проблемы прочности*. 2017. №2. С. 36-48.
9. Антонов А.А. Исследование полей остаточных напряжений в сварных конструкциях // *Территория нефтегаз*. 2014. Т. 28. №12. С. 966-969.
10. Настека В.В., Коренякин А.Ф., Низамов Н.Ф., Чирков Е.Ю., Кушнarenко В.М., Каменев С.В. Напряженно-деформированное состояние металла корпусов фонтанной арматуры до и после наплавки // *Вестник Оренбургского государственного университета. Машиностроение*. 2013. №1. С. 212-217.

### References

1. Ivanov V.P., Vigerina T.V. Vosstanovleniye kolenchatykh valov avtomobil'nykh dvigateley [Restoration of crankshafts of automobile engines]. *Palmarium Academic Publishing*. 2019. 210 (In Russian).
2. Denisov A.S., Pogorazdov V.V., Tugushev B.F., Gorshenina E. Yu. Tekhnologicheskoye obespecheniye kachestva vosstanovlennykh kolenchatykh valov dizel'nykh dvigateley [Technological quality assurance of restored crankshafts of diesel engines]. *Vestnik*

*Saratovskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta. 2010. Vol. 4. N1(49). 49-55 (In Russian).*

3. Konovalov A.V., Nerovnyy V.M., Kurkin A.S. *Teoriya svarochnykh protsessov [Theory of welding processes]. Moscow: Izd-vo MGTU im. N.E. Baumana. 2007. 752 (In Russian).*

4. Stepin P.A. *Soprotivleniye materialov [Strength of materials]. Saint Petersburg.: Lan'. 2012. 320 (In Russian).*

5. Volkov I.A., Korotkikh Yu.G., Tarasov I.S., Shishchlin D.N. *Chislennoye modelirovaniye uprugoplasticheskogo deformirovaniya i nakopleniya povrezhdeniy v metallakh pri malotsiklovoy ustalosti [Numerical simulation of elastic-plastic deformation and damage accumulation in metals at low-cycle fatigue]. Problemy prochnosti. 2011. N4. 147-165 (In Russian).*

6. Makhlov M.S., Blyumenshteyn V.Yu. *Mekhanika protsessa PPD. Ostatochnyye napryazheniya v uprochnyayemom uprugoplasticheskom tele [The mechanics of the PPD process. Residual stresses in the reinforced elastic-plastic body]. Obrabotka metallov (tehnologiya, oborudovaniye, instrumenty). 2019. Vol. 21. N2. 110-123 (In Russian).*

7. Andrushchenko M.I. *Razrabotka tekhnologii vosstanovleniya i uprochneniya kolenchatogo vala kolenorychazhnykh pressov. Chast' 1. Analiz usloviy truda, kharakteristika [Development of technology for recovery and strengthening of the crankshaft of crank presses. Part 1. Analysis of working conditions, characteristics]. Problemy tribologii. 2017. N4. 33-38 (In Russian).*

8. Yanagisawa Y., Kishi Y., Sasakib K. *Analysis of Residual Stresses during Heat Treatment of Large Forged Shafts Considering Transformation Plasticity and Creep Deformation. Problemy prochnosti. 2017. N2. C. 36-48.*

9. Antonov A.A. *Issledovaniye poley ostatochnykh napryazheniy v svarnykh konstruktsiyakh [Studying of residual stress fields in welded structures]. Territoriya neftegaz. 2014. Vol. 28. N12. 966-969 (In Russian).*

10. Nasteka V.V., Korenyakin A.F., Nizamov N.F., Chirkov E.YU., Kushnarenko V.M., Kamenev S.V. *Napryazhenno-deformirovannoye sostoyaniye metalla korpusov fontannoy armatury do i posle naplavki [Stress-strain state of the metal bodies of fountain valves before and after surfacing]. Vestnik Orenburgskogo gosudarstvennogo universiteta. Mashinostroyeniye. 2013. N1. 212-217 (In Russian).*