

ДИНАМИКА КОНСТРУКЦИЙ И СООРУЖЕНИЙ
DYNAMICS OF STRUCTURES AND BUILDINGSDOI 10.22363/1815-5235-2020-16-2-146-151
УДК 539.3

НАУЧНАЯ СТАТЬЯ

Механизм наноструктурирования поверхности деталей машиностроения при дробеструйной обработке

Г.Л. Колмогоров, А.С. Высотин*

Пермский национальный исследовательский политехнический университет, *Российская Федерация, 614990, Пермь, Комсомольский пр., 29*
*vysotin.dpm@mail.ru

История статьи:

Поступила в редакцию: 25 ноября 2019 г.

Доработана: 10 марта 2020 г.

Принята к публикации: 14 марта 2020 г.

Аннотация

Актуальность. В работе рассматривается дробеструйная обработка, являющаяся широко применяемым методом для улучшения определенных свойств поверхности деталей (таких как усталостная прочность, твердость, долговечность) благодаря холодной пластической деформации, в результате которой происходит наноструктурирование поверхности обрабатываемого материала, сопровождающееся уменьшением размеров зерна его кристаллической структуры. Изучены условия формирования наноструктурированного поверхностного слоя при обработке деталей потоком дроби. **Целью** исследования является определение условий наноструктурирования поверхности при дробеструйной обработке за счет холодной пластической деформации, определяемой воздействием дроби, которая соударяется с обрабатываемой поверхностью с высокой скоростью. **Методы.** Для решения поставленной задачи использованы уравнения контактной задачи теории упругости о действии сосредоточенной силы на упругое полупространство, роль которого выполняет обрабатываемая деталь. Определены условия наступления пластической деформации в поверхностных слоях обрабатываемой детали. Холодная пластическая деформация обеспечивает наноструктурирование поверхностного слоя обрабатываемой детали, повышение прочности, усталостной долговечности, улучшение триботехнических характеристик. **Результаты.** На основании контактной задачи теории упругости решена задача формирования наноструктурированного слоя на поверхности обрабатываемой детали при дробеструйной обработке. Получена аналитическая зависимость, позволяющая прогнозировать переход материала в пластическое состояние и наноструктурировать поверхность обрабатываемой детали при дробеструйной обработке.

Ключевые слова: дробеструйная обработка, поверхностное пластическое деформирование, остаточные напряжения, предел выносливости, усталость, наноструктурирование поверхности, холодная пластическая деформация

Для цитирования

Колмогоров Г.Л., Высотин А.С. Механизм наноструктурирования поверхности деталей машиностроения при дробеструйной обработке // Строительная механика инженерных конструкций и сооружений. 2020. Т. 16. № 2. С. 146–151. <http://dx.doi.org/10.22363/1815-5235-2020-16-2-146-151>

Введение

Современный мир российского и зарубежного машиностроения сталкивается со многими пробле-

мами. В процессе эксплуатации под действием внешних нагрузок в деталях накапливаются дефекты, которые приводят к нарушению работоспособности деталей и излому. Для борьбы с подобными проблемами в современном машиностроении используются различные методы, такие как конструктивные, технологические и профилактические. Конструктивные методы включают применение различных виброгасителей, обеспечение рациональных значений геометрических параметров деталей, уз-

Колмогоров Герман Леонидович, доктор технических наук, профессор кафедры динамики и прочности машин, заслуженный работник высшей школы РФ; eLIBRARY SPIN-код: 8482-2065, Scopus Author ID: 6603959401.

Высотин Александр Сергеевич, аспирант кафедры динамики и прочности машин.

© Колмогоров Г.Л., Высотин А.С., 2020

This work is licensed under a Creative Commons Attribution 4.0 International License
<https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>

лов машин и жесткости опор и т.д. К профилактическим методам относится систематический осмотр деталей для выявления повреждений, своевременная их замена и другие мероприятия по техническому обслуживанию машин и механизмов.

Анализ характера поломок деталей машин показывает, что большинство из них следует отнести к классу усталостных разрушений деталей, имеющих концентраторы напряжений. Следовательно, из технологических методов наиболее известными являются устранение или уменьшение технологических концентраторов напряжений (прижоги при шлифовании, закалочные трещины и т. д.), балансировка вращающихся деталей, термическая (поверхностная закалка) и химико-термическая (азотирование), а также применение методов упрочнения деталей поверхностным пластическим деформированием, обеспечивающих повышение усталостной прочности [1–5]. Проведено немало исследований по проблемам поверхностного пластического деформирования: от влияния и взаимодействия параметров на усталостную долговечность до оценки величины остаточных напряжений и их прогнозирования на поверхности деталей после дробеструйного упрочнения [6–9]. Однако многолетний опыт использования дробеструйной обработки не позволяет объяснить все эффекты положительного влияния на свойства деталей только наличием сжимающих остаточных напряжений в их поверхностном слое, поскольку наряду с ними в объеме обрабатываемой детали из условия самоуравновешенности формируются и остаточные напряжения растяжения [10; 11]. Это и является главным недостатком многих работ по оценке сопротивления усталости, несмотря на то, что остаточные напряжения сжатия в поверхностном слое позволяют снизить действие растягивающих напряжений при эксплуатации более чем на 20 % [12]. Также к недостаткам современных исследований можно отнести отсутствие учета временного фактора при расчетах напряженно-деформированного состояния в очаге деформации и вычисления остаточных напряжений в упрочненной детали, что может привести к появлению дополнительной погрешности [13].

1. Формирование наноструктурированного слоя при обработке дробью

В работе [14] эффект повышения эксплуатационных свойств деталей и материалов при дробеструйном упрочнении объясняется образованием наноструктурированного поверхностного слоя. Когда на поверхность металлической детали воздействует поток сферических частиц с высокой скоростью, происходит наноструктурирование за счет холод-

ной пластической деформации в тонком поверхностном слое детали. Само понятие «наноструктурирование» означает получение стабильной фазы, зернистость которой составляет от нескольких десятков нанометров до нескольких десятков микрометров. Наноструктурирование поверхности позволяет объяснить те положительные эффекты, которые обеспечивает дробеструйная обработка поверхности деталей. При наноструктурировании поверхности материала увеличивается усталостная долговечность, твердость, коррозионная стойкость, трибологические свойства [14]. Аналогичные исследования проводятся и за рубежом [15].

Сущность технологии дробеструйной обработки заключается в следующем. Поверхность обрабатываемой детали подвергают воздействию металлических закаленных микрошариков из сталей ПР10Р6М5 или ШХ15, диаметр шариков 0,16–2 мм. Упрочнение деталей микрошариками выполняют на специальных дробеметных установках, обеспечивающих равномерный поток микрошариков со скоростью 60–80 м/с. Данная технология широко применяется для упрочнения деталей машиностроения, в частности деталей авиационных двигателей.

В результате холодной пластической деформации, которая реализуется в процессе дробеструйной обработки, происходит наноструктурирование поверхности обрабатываемого металла, приводящее к уменьшению размеров зерна кристаллической структуры поверхностных слоев. Необходимое условие наноструктурирования – холодная пластическая деформация. Холодная пластическая деформация – это деформация, при которой металл поверхности упрочняется без следов рекристаллизации, что и происходит при дробеструйной обработке.

Наноструктурирование поверхностного слоя приводит к повышению твердости за счет наклепа поверхностного слоя металла. Кроме того, в процессе дробеструйной обработки в поверхностном слое формируются сжимающие остаточные напряжения, повышающие усталостную прочность обрабатываемого металлоизделия.

2. Практическое исследование упрочнения деталей при дробеструйной обработке

В АО «ОДК – Пермские моторы» проводили исследования упрочнения хвостовиков рабочих лопаток из сплава ЖС32-ВИ при дробеструйной обработке. В результате определения остаточных напряжений по методу Давиденкова сжимающие напряжения на расстоянии 2 мкм от поверхности составляют $\sigma_{ост} = -379$ МПа, на расстоянии 5 мкм – $\sigma_{ост} = -302$ МПа, на расстоянии 10 мкм – $\sigma_{ост} = -167$ МПа. При дальнейшем увеличении рас-

стояния от поверхности остаточные сжимающие напряжения снижаются, переходят в растягивающие и на расстоянии 200 мкм составляют $\sigma_{ост} = 15$ МПа. Можно полагать, что наноструктурированный поверхностный слой составляет 5 мкм.

Накопление взаимно уравновешенных остаточных напряжений в процессе деформации является характерным для упрочнения (наклепа) в процессе дробеструйной обработки. Накопленные сжимающие остаточные напряжения в поверхностном слое могут благоприятно влиять на эксплуатационные свойства деталей после дробеструйного упрочнения.

3. Способ определения упрочненного (наноструктурированного) слоя

Выявление условий формирования наноструктурированного слоя за счет холодной пластической деформации поверхностного слоя при дробеструйной обработке деталей машиностроения является целью работы. Для решения данной задачи было использовано известное из теории упругости решение о действии сосредоточенной силы на упругое полупространство [16]. На рис. 1 представлена расчетная схема.

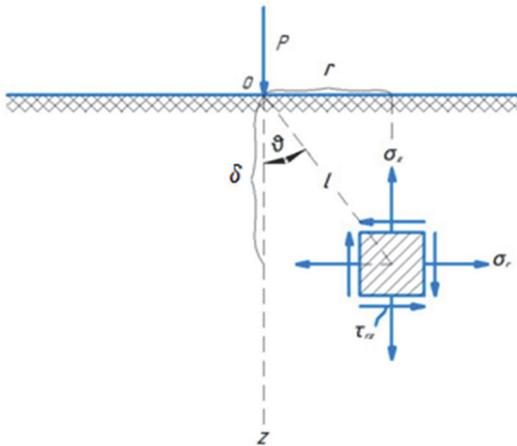


Рис. 1. Сосредоточенная сила, действующая на плоскость, ограничивающую полубесконечное тело
[Figure 1. Concentrated force acting on a plane bounding a semi-infinite body]

Выражения для напряжений в данной задаче имеют следующий вид [16]:

$$\left. \begin{aligned} \sigma_z &= -\frac{3Pz^3}{2\pi l^5}; \\ \sigma_r &= -\frac{P}{2\pi} \left[\frac{1-2\mu}{l(l+z)} - \frac{3zr^2}{l^5} \right]; \\ \sigma_t &= \frac{P}{2\pi} (1-2\mu) \left[\frac{z}{l^3} - \frac{1}{l(l+z)} \right]; \\ \tau_{rz} &= \frac{-3Pz^2r}{2\pi l^5}, \end{aligned} \right\} \quad (1)$$

где P – действующее усилие, равное усилию действия одной дробинки; μ – коэффициент Пуассона материала обрабатываемой детали.

Максимальные напряжения соответствуют оси z ($r = 0$). При $r = 0$, $z = l$ соотношения (1) принимают вид

$$\left. \begin{aligned} \sigma_z &= -\frac{3}{2} \frac{P}{\pi l^2}; \\ \sigma_r &= -\frac{P(1-2\mu)}{4\pi l^2}; \\ \sigma_t &= \frac{P(1-2\mu)}{4\pi l^2}; \\ \tau_{rz} &= 0. \end{aligned} \right\} \quad (2)$$

Задачей решения является достижение пластической деформации при дробеструйном упрочнении, которая обеспечивает формирование наноструктурированного слоя в поверхностном слое детали. Реализация пластической деформации возможна при использовании критерия пластичности Мизеса для напряженного состояния, описываемого соотношениями (2). Критерий пластичности Мизеса имеет следующий вид

$$\frac{1}{\sqrt{2}} \sqrt{(\sigma_z - \sigma_r)^2 + (\sigma_r - \sigma_t)^2 + (\sigma_z - \sigma_t)^2} = \sigma_T, \quad (3)$$

где σ_T – предел текучести материала обрабатываемой детали.

Для материалов в условиях пластического состояния принято использовать условие несжимаемости, согласно которому коэффициент Пуассона $\mu = 0,5$. Тогда из уравнений (2) имеем для $\mu = 0,5$

$$\sigma_z = -\frac{3}{2} \frac{P}{\pi l^2}, \quad \sigma_r = 0, \quad \sigma_t = 0.$$

При этом условие пластичности (3) принимает вид

$$\frac{3}{2} \frac{P}{\pi l^2} = \sigma_T. \quad (4)$$

Из соотношения (4) следует, что толщина наноструктурированного поверхностного слоя при дробеструйной обработке равна

$$\delta = l = \sqrt{\frac{3}{2} \frac{P}{\pi \sigma_T}}. \quad (5)$$

Усилие P определяется произведением давления струи воздуха с дробью p_0 на площадь сечения ударяемой дробинки и углом наклона струи дробинки к обрабатываемой поверхности:

$$P = p_0 \pi R^2 \sin \alpha, \quad (6)$$

где R – радиус применяемой дробинки; α – угол между направлением струи дробинки и поверхностью обрабатываемой детали.

Подстановка выражения (6) в соотношение (5) дает формулу для определения толщины наноструктурированного слоя при дробеструйной обработке:

$$\delta = R \sqrt{\frac{2 p_0 \sin \alpha}{3 \sigma_T}} \quad (7)$$

На рис. 2 приведены расчетные зависимости толщины наноструктурированного слоя на поверхности при дробеструйной обработке от предела текучести обрабатываемого металла по формуле (7) для $R = 10^{-4}$ м, $\alpha = 30^\circ$ для $p_0 = 0,1; 0,2; 0,3; 0,4; 0,5$ МПа.

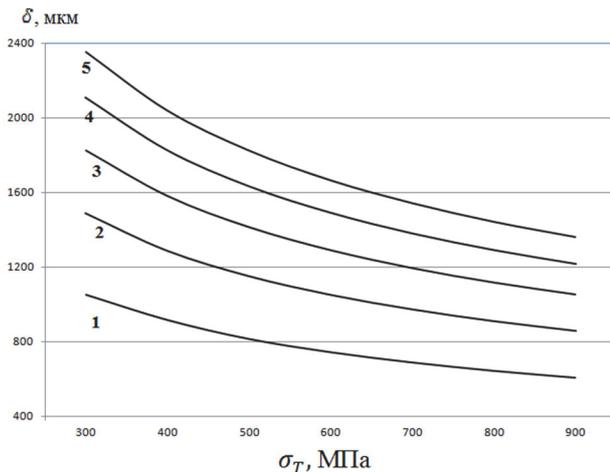


Рис. 2. Зависимость толщины наноструктурированного слоя обрабатываемого материала от предела текучести:

1 — $p_0 = 0,1$ МПа; 2 — $p_0 = 0,2$ МПа; 3 — $p_0 = 0,3$ МПа;
4 — $p_0 = 0,4$ МПа; 5 — $p_0 = 0,5$ МПа

[Figure 2. Dependence of the thickness of the nanostructured layer of the produced material on the yield strength:

1 — $p_0 = 0,1$ МПа; 2 — $p_0 = 0,2$ МПа; 3 — $p_0 = 0,3$ МПа;
4 — $p_0 = 0,4$ МПа; 5 — $p_0 = 0,5$ МПа]

Из рис. 2 следует, что повышение предела текучести материала приводит к уменьшению толщины наноструктурированного слоя, а также, что толщина наноструктурированного слоя зависит от давления в струе дроби. Формула (7) составляет основу полученного патента [17].

Заключение

На основании решения контактной задачи теории упругости о действии силы на упругое полупространство предлагаются формулы для расчета технологических параметров дробеструйной обработки деталей машиностроения, в частности формирования наноструктурированного слоя на поверхности детали.

При холодной пластической деформации, реализуемой в процессе дробеструйной обработки, происходит измельчение зерен кристаллической струк-

туры поверхности обрабатываемого металла до наноразмеров, что способствует повышению усталостной долговечности, твердости, коррозионной стойкости, улучшению триботехнических характеристик.

Наличие наноструктурированного слоя на поверхности обеспечивает улучшение характеристик длительной и усталостной прочности, поскольку с позиции механики разрушения поверхность определяет опасность образования и роста трещин, приводящих к разрушению деталей машиностроения.

Список литературы

1. Кузнецов Н.Д., Цейтлин В.И., Волков В.И. Технологические методы повышения надежности деталей машин: справочник. М.: Машиностроение, 1993. 304 с.
2. Кирпичев В.А., Букатый А.С., Чирков А.В. Прогнозирование сопротивления усталости поверхностно упрочненных гладких деталей // Известия высших учебных заведений. Поволжский регион. Технические науки. 2012. № 3 (23). С. 102–109.
3. Евстигнеев М.И., Подзей А.В., Сулима А.М. Технология производства двигателей летательных аппаратов. М.: Машиностроение, 1982. 263 с.
4. Сулима А.М., Шулов В.А., Ягодкин Ю.Д. Поверхностный слой и эксплуатационные свойства деталей машин. М.: Машиностроение, 1988. 240 с.
5. Сургутанов Н.А. Моделирование и определение закономерностей развития трещины усталости в поверхностном слое упрочненных деталей: дис. ... канд. техн. наук. Самара, 2019. 127 с.
6. Лавриненко Ю.А. Экспериментальная проверка напряженно-деформированного состояния пружин сжатия при выполнении упрочняющих операций // Известия ТулГУ. Технические науки. 2017. № 9. Ч. 1. С. 444–449.
7. Костичев В.Э. Применение динамического моделирования для оценки влияния упрочняющей обработки на сопротивление усталости // Вестник Самарского государственного аэрокосмического университета имени академика С.П. Королева (национального исследовательского университета). 2015. № 1 (14) Ч. 1. С. 147–153.
8. Вакулюк В.С., Сазанов В.П. Анализ влияния схемы упрочнения поверхности образцов с галтелями на распределение остаточных напряжений в опасном сечении // Вестник УГАТУ. 2014. Т. 18. № 1 (62). С. 48–52.
9. Mahagaonkar S., Brahmankar P., Seemikeri C. Effect On Fatigue Performance of Shot Peened Components: An Analysis Using Doe Technique // Int. J. Fatig. 2009. No. 31. Pp. 693–702.
10. Денисов А.С., Верхутов А.А., Виденев А.А., Юдин В.М. Оценка изменения несущей способности коленчатого вала в процессе усталостного разрушения // Техническое регулирование в транспортном строительстве. 2016. № 2 (16). С. 64–67.
11. Шарков О.В., Золотов И.А., Калинин А.В. Прогнозирование усталостной долговечности деталей машин с применением метода конечных элементов // Из-

вестия Калининградского технического университета. 2014. № 35. С. 209–218.

12. *Марьина Н.Л.* Концентрация напряжений в колечатом вале в условиях поверхностного пластического деформирования // *Современные материалы. Техника и технологии.* 2016. № 1 (4). С. 142–145.

13. *Зайдес С.А., Нго К.К.* Современный подход к определению напряженного состояния в очаге деформации при локальном нагружении // *Известия высших учебных заведений. Машиностроение.* 2016. № 7 (676). С. 56–63.

14. Пат. 2579323 Российская Федерация. Обработка поверхности металлической детали / Презо Т., Мюллер Т., Самуэль Д. № 2013133955/2; заявл. 29.12.2011; опубл. 10.04.2016. Бюл. № 10.

15. *Todaka Y., Umemoto M., Yamazaki A., Wang C., Tsuchiya K., Watanabe Y.* Formation of surface nanocrystalline structure in steels by shot peening and role of strain gradient on grain refinement by deformation // *Iron and Steel Institute of Japan, ISIJ International.* 2007. Vol. 47. No. 1. Pp. 157–162.

16. *Безухов Н.И.* Основы теории упругости, пластичности и ползучести. М.: Высшая школа, 1957. 527 с.

17. Пат. 2704341 Российская Федерация. Способ формирования сжимающих остаточных напряжений при дробеструйной обработке деталей / Колмогоров Г.Л., Корионов М.А., Высотин А.С. № 2019117194; заявл. 03.06.2019; опубл. 28.10.2019. Бюл. № 31.

RESEARCH PAPER

The mechanism of nanostructuring the surface of engineering parts during shot blasting

German L. Kolmogorov, Alexandr S. Vysotin*

Perm National Research Polytechnic University, 29 Komsomolskii Ave, Perm, 614000, Russian Federation
*vysotin.dpm@mail.ru

Article history:

Received: November 25, 2019

Revised: March 10, 2020

Accepted: March 14, 2020

For citation

Kolmogorov G.L., Vysotin A.S. The mechanism of nanostructuring the surface of engineering parts during shot blasting. *Structural Mechanics of Engineering Constructions and Buildings.* 2020;16(2):146–151. <http://dx.doi.org/10.22363/1815-5235-2020-16-2-146-151>. (In Russ.)

Abstract

Relevance. The paper considers shot blasting, which is a widely used method for improving the surface properties of parts (such as fatigue strength, hardness, and elongation) due to cold plastic deformation, which results in nanostructuring of the surface of the processed material, accompanied by a reduction in the grain size of its crystal structure. The conditions for the formation of a nanostructured surface layer when processing parts with a shot stream are studied. **The aim of the work** is to determine the conditions of nanostructuring during shot blasting due to plastic deformation, determined by the impact of the shot, which collides with the treated surface at high speed. **Methods.** To solve the stated problems, we used the solution of the contact problem of the theory of elasticity on the action of a concentrated force on the elastic half-space, the role of which is played by the workpiece. The conditions of the onset of plastic deformation in the surface layers of the workpiece are determined. Cold plastic deformation provides nanostructuring of the surface layer of the workpiece, increasing strength, fatigue life, atomic diffusion and improving tribotechnical characteristics. **Results.** Based on the contact problem of the theory of elasticity, the problem of the formation of a nanostructured layer on the surface of the workpiece during shot blasting has been solved. An analytical dependence has been obtained, which allows predicting the transition of the material to a plastic state and nanostructuring the surface of the workpiece during shot blasting.

Keywords: shot blasting, surface plastic deformation, residual stresses, endurance limit, fatigue, nanostructuring, cold plastic deformation

References

1. Kuznetsov N.D., Tseytlin V.I., Volkov V.I. *Tekhnologicheskie metody povysheniya nadyozhnosti detalej mashin* [Technological methods to improve the reliability of machine parts]. Moscow, Mashinostroenie Publ.; 1993. (In Russ.)
2. Kirpichev V.A., Bukatyy A.S., Chirkov A.V. Prediction of fatigue resistance of surface-hardened smooth

parts. *News of higher educational institutions. Povolzhskiy region. Technical Science.* 2012;3(23):102–109. (In Russ.)

3. Evstigneev M.I., Podzey A.V., Sulima A.M. *Tekhnologiya proizvodstva dvigatelej letatel'nykh apparatov* [Production technology of aircraft engines]. Moscow, Mashinostroenie Publ.; 1982. (In Russ.)

4. Sulima A.M., Shulov V.A., Yagodkin Yu.D. *Poverhnostnyj sloj i ekspluatatsionnye svoystva detalej mashin* [Surface layer and operational properties of machine parts]. Moscow, Mashinostroenie Publ.; 1988. (In Russ.)

5. Surgutanov N.A. *Modelirovanie i opredelenie zakononomernostei razvitiya treschiny ustalosti v poverhnostnom*

German L. Kolmogorov, Dr. Sci. (Eng.), Professor of the Dynamics and Strength of Machine Department, Honored Worker of the Higher School of the Russian Federation; eLIBRARY SPIN-code: 8482-2065, Scopus Author ID: 6603959401. *Alexandr S. Vysotin*, graduate student of the Dynamics and Strength of Machine Department.

sloe uprochnennih detalei [Modeling and determination of patterns of fatigue crack development in the surface layer of hardened parts] (PhD Diss.). Samara; 2019. (In Russ.)

6. Lavrinenko Y.A. Experimental verification of the stress-strain state of compression springs during reinforcing operations. *News of Tula State University. Technical science*. 2017;9(1):444–449. (In Russ.)

7. Kostichev V.E. The use of dynamic modeling to assess the effect of hardening treatment on fatigue resistance. *Bulletin of the Samara State Aerospace University named after academician S.P. Korolev (National Research University)*. 2015;1(14, Part 1):147–153. (In Russ.)

8. Vakulyuk V.S., Sazanov V.P. Analysis of the influence of the surface hardening scheme of samples with fillets on the distribution of residual stresses in a dangerous section. *Bulletin of USATU*. 2014;18(1–62):48–52. (In Russ.)

9. Mahagaonkar S., Brahmankar P., Seemikeri C. Effect on Fatigue Performance of Shot Peened Components: An Analysis Using Doe Technique. *Int. J. Fatig.* 2009;(31): 693–702.

10. Denisov A.S., Verkhutov A.A., Videnev A.A., Yudin V.M. Assessment of changes in the bearing capacity of the crankshaft in the process of fatigue failure. *Technical regulation in transport construction*. 2016;2(16):64–67. (In Russ.)

11. Sharkov O.V., Zolotov I.A., Kalinin A.V. Prediction of fatigue life of machine parts using the finite element

method. *Proceedings of the Kaliningrad Technical University*. 2014;35:209–218. (In Russ.)

12. Maryina N.L. The stress concentration in the crankshaft under conditions of surface plastic deformation. *Modern materials. Technics and technology*. 2016;1(4):142–145. (In Russ.)

13. Zaydes S.A., Ngo K.K. A modern approach to determining the stress state in the deformation zone under local loading. *News of higher educational institutions. Engineering*. 2016;7(676):56–63. (In Russ.)

14. Prezo T., Mueller T., Samuel J. *Obrabotka poverhnosti metallicheskoj detali [Surface Treatment of Metal Part]*. Patent RF, no. 2579323; 2016. (In Russ.)

15. Todaka Y., Umamoto M., Yamazaki A., Wang C., Tsuchiya K., Watanabe Y. Formation of surface nanocrystalline structure in steels by shot peening and role of strain gradient on grain refinement by deformation. *ISIJ International*. 2007;47(1):157–162.

16. Bezukhov N.I. *Osnovy teorii uprugosti, plastichnosti i polzuchesti [Fundamentals of the theory of elasticity, plasticity and creep]*. Moscow, Vysshaya shkola Publ.; 1951. (In Russ.)

17. Kolmogorov G.L., Korionov M.A., Vysotin A.S. *Sposob formirovaniya szhimayushchih ostatochnyh napryazhenij pri drobestrujnoj obrabotke detalej [The method of forming compressive residual stresses during shot blasting of parts]*. Patent RF, no. 2704341; 2019. (In Russ.)